



Experimental and Numerical Investigation of Ballistic Impact on Ceramic–Metal Combined Targets with Different Nosed Projectiles

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sayah-Badkhor M.¹ PhD,
Naddaf-Oskouei A.^{*2} PhD,
Kashani D.¹ MSc,
Agha Mola Tehrani M.¹ MSc

How to cite this article

Sayah-Badkhor M, Naddaf-Oskouei A, Kashani D, Agha Mola Tehrani M. Experimental and Numerical Investigation of Ballistic Impact on Ceramic–Metal Combined Targets with Different Nosed Projectiles. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):677-687.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Eyvanekey University, Eyvanekey, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Imam Hossein Comprehensive University, Babayi Expressway, Tehran, Iran. Postal code: 1698715861

Phone: +98 (23) 34521596

Fax: +98 (23) 31432

anadaf@ihu.ac.ir

Article History

Received: May 20, 2019

Accepted: July 9, 2019

ePublished: March 01, 2020

ABSTRACT

There are many effective parameters in impact mechanics. In this article, the relation between the depth of penetration and the projectile nose shape has been investigated. Projectiles were made of AISI 4340 material with flat, ogive, and hemispherical nose shapes. Semi-infinite targets made of alumina ceramic 99.5 and aluminum 7000. The projectile impact velocity in this experimental test was about 400m/s and the thickness of ceramic and aluminum were 4 and 20mm, respectively. A numerical simulation has been conducted by Abaqus software. The results of the numerical simulation show a good agreement with the empirical observations. The depth of penetration for the flat projectile and ogive projectile was highest and lowest, respectively. The ballistic limit velocity for the flat projectile and ogive projectile was lowest and highest, respectively. Projectile erosion is affected by the ceramic thickness and the shape of the projectile. The amount of this erosion for the flat projectile and ogive projectile was lowest and highest, respectively. Increasing ceramic thickness leads to more erosion in the projectile. Also, the changes of ballistic limit velocity have been determined with the changes of ceramic and backing metal thickness.

Keywords Projectile Penetration; Combined Targets; Projectile Shape; Numerical Simulation; Experimental Test

CITATION LINKS

[1] Interaction of projectiles and composite ... [2] A theory for the deceleration of long rods after ... [3] Mechanics of penetration and ... [4] The mechanics of penetration of projectiles into ... [5] The relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic ... [6] A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour ... [7] Impact on ceramic faced ... [8] Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight ... [9] A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite ... [10] Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite ... [11] Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to ... [12] Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose ... [13] Penetration analysis of a projectile in ceramic composite ... [14] Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable ... [15] The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid ... [16] Experimental study on the perforation process of 5754-H111 and 6082-T6 aluminium plates subjected to normal impact by conical, hemispherical and blunt ... [17] Experimental investigation on the ballistic performance of double-layered plates subjected to impact by projectile of high ... [18] Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer ... [19] Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon carbide/aluminium ... [20] Experimental study of projectiles with flat, conical and hemispherical nose shapes on low velocity impact on ... [21] On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical ... [22] Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally ... [23] Effects of head shape of projectiles on hypervelocity impact cratering on aluminum 5052 alloy ... [24] A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high ... [25] Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures ... [26] A FEM study of explosive welding of double layer ... [27] Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate ... [28] Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material ... [29] Studying the performance of multi-layered ceramic-epoxy ...

بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک پرتابه‌هایی با دماغه متفاوت در اهداف ترکیبی سرامیک-فلز

مصطفی سیاح بادخور PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

علیرضا نداف اسکوتی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

دانیال کاشانی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

مهدی آقاملاطهرانی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

چکیده

در مکانیک ضربه، پارامترهای تاثیرگذار بسیاری در برخوردها وجود دارند. در این مقاله به بررسی یکی از این پارامترها یعنی رابطه بین عمق نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک-فلز با شکل دماغه پرتابه، پرداخته شده است. پرتابه‌هایی با شکل دماغه تخت، اجابو و نیم‌کره از جنس فولادی AISI 4340 و اهداف نیمه بی‌نهایت از جنس سرامیک آلومینا ۹۹/۵٪ و آلومینیوم سری ۷۰۰۰ هستند. در آزمایش تجربی، سرعت برخورد پرتابه در حدود ۴۰۰ متر بر ثانیه و ضخامت سرامیک و آلومینیوم به ترتیب ۴ و ۴۰ میلی‌متر بوده است. شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار قدرتمند آباکوس انجام شده است. مقدار عمق نفوذ به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی، مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. مقدار عمق نفوذ برای پرتابه با دماغه تخت بیشترین و برای پرتابه با دماغه اجابو کمترین بوده است. همچنین مقدار سرعت حد بالستیک برای پرتابه تخت کمترین و برای پرتابه اجابو بیشترین بوده است. ضخامت سرامیک همراه شکل پرتابه روی مقدار سایش پرتابه تاثیرگذار است. مقدار این سایش در پرتابه اجابو بیشترین و در پرتابه تخت کمترین بوده است و با افزایش ضخامت سرامیک این مقادیر افزایش یافته است. تغییرات سرعت حد بالستیک با تغییرات ضخامت پشتیبان و سرامیک نیز تعیین شده است.

کلیدواژه‌ها: نفوذ پرتابه، اهداف ترکیبی، شکل پرتابه، شبیه‌سازی عددی، آزمایش تجربی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۸

*نویسنده مسئول: anadaf@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه سرامیک‌ها با توجه به سختی بالا در مقابل نفوذ پرتابه‌ها کاربرد فراوانی دارند. سرامیک‌ها با استفاده از مقاومت بالا و سخت‌بودن خود باعث کاهش انرژی جنبشی پرتابه و فرسایش آن می‌شوند؛ بنابراین برخورد پرتابه به هدف سرامیکی، موجب کاهش قدرت نفوذ آن خواهد شد. شکل دماغه پرتابه با توجه به سختی بیشتر سرامیک، در میزان فرسایش و در نتیجه عمق نفوذ تاثیرگذار است. سرامیک به‌تنهایی مقاومت پایینی در مقابل نفوذ دارد و این به علت خاصیت تُردبودن آن است. بنابراین برای تقویت هدف از ترکیب سرامیک با یک فلز یا کامپوزیت به‌عنوان پشتیبان استفاده می‌شود. یک هدف ترکیبی سرامیکی باید علاوه بر مقاومت بالا در مقابل نفوذ، چگالی و ضخامت کمی هم داشته باشد. در زمینه نفوذ پرتابه در اهداف

ترکیبی سرامیکی بررسی‌های تحلیلی، تجربی و عددی مختلفی صورت گرفته است. در این بررسی‌ها عوامل مختلفی از جمله زاویه برخورد پرتابه، سرعت برخورد، ضخامت سرامیک و پشتیبان، جنس سرامیک و پشتیبان، جنس و شکل پرتابه و غیره مورد توجه بوده است. هر کدام از این بررسی‌ها، نتایج مهمی در زمینه نفوذ داشته است.

فلورنس و آرنز^[1]، مدل تحلیلی برای تعیین سرعت حد بالستیک برای نفوذ پرتابه‌های فولادی در زره‌های سرامیکی ارائه کردند. آنها بررسی خود را به دو صورت تحلیلی و تجربی انجام دادند. آنها آنالیز تحلیلی خود را بر اساس تئوری الاستیسیته انجام دادند. تیت^[2]، به بررسی نفوذ پرتابه‌های میله‌بلند در اهداف سرامیکی پرداخت. او در بررسی‌های خود از تئوری هیدرودینامیکی اصلاح شده استفاده کرد. ویلکینز^[3]، به ارائه یک مدل برای بررسی مدل‌های شکست از روش‌های محاسباتی پرداخت. او در مدل خود از سرامیک به‌عنوان صفحه جلویی و آلومینیوم به‌عنوان پشتیبان استفاده کرد. بکمن و گلداسمیت^[4]، یک مدل کامل از فرآیند نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیکی که شامل نفوذ کامل و کمانه‌کردن بود، ارائه کردند. آنها یک دسته‌بندی از اهداف به‌صورت نیمه‌بی‌نهایت، ضخیم، متوسط و نازک انجام دادند. روزنبرگ و یسورون^[5]، به انجام آزمایش‌های بالستیک به‌وسیله پرتابه‌های سوراخ‌کن زره در اهداف سرامیکی پرداختند. آنها از یک صفحه پشتیبان ضخیم در آزمایش‌های خود استفاده کردند و به بررسی اثر ضخامت پشتیبان بر عمق نفوذ پرداختند. وودوارد^[6]، مدلی یک‌بعدی برای نفوذ گلوله در اهداف سرامیکی ارائه کرد. این مدل به روش انباشت جرم بوده است. اساس این روش، فرسایش سرامیک و پرتابه است و برآورد مناسبی از سرعت پرتابه، جرم کاهش‌یافته آن و همچنین نفوذ یا عدم نفوذ ارائه می‌کند. دن‌ریجر^[7]، در پایان‌نامه خود به توسعه مدل وودوارد پرداخت. اساس کار او نیز بر مبنای جرم انباشته بود. زائر^[8] و سانچزگالوز^[9]، به ارائه یک مدل تحلیلی برای ضربه قائم و مایل پرتابه روی اهداف ترکیبی سرامیک-فلز بر اساس معادله الکسیوسکی و تیت پرداختند. مدل آنها، با نتایج تجربی نسبت به مدل‌های قبلی مطابقت بهتری را نشان می‌داد. چوکرون و سانچزگالوز^[9]، یک مدل ساده تحلیلی از نفوذ پرتابه به داخل اهداف زرهی سرامیک-کامپوزیت ارائه کردند. آنها مدل خود را با روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی نیز مقایسه نمودند. فلوز و بارتن^[10]، مدلی تحلیلی از نفوذ پرتابه در هدف ترکیبی سرامیک-فلز ارائه کردند. مدل آنها با دقت خیلی خوبی تمامی مراحل نفوذ پرتابه در هدف را از تغییر شکل‌های پرتابه تا فرسایش سرامیک در نظر گرفتند. این مدل با داده‌های تجربی که در گذشته برای پرتابه‌های میله‌بلند در اهداف مشابه ارائه‌شده بودند، کاملاً منطبق بود. زائر^[8] و همکاران^[11] به بررسی اثرات چسب اتصال‌دهنده سرامیک و فلز در مقابل نفوذ پرتابه پرداختند. آنها دو نوع چسب مختلف را با ضخامت‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در سرعت‌های بالا، نوع چسب و ضخامت آن تاثیر کمی روی تابع هدف

نفوذ پرتابه کروی صلب در صفحات با تغییر شکل‌های زیاد پرداختند. بابایی و همکاران^[22] نیز به ارایه یک مدل بدون بعد برای مدل تحلیلی خود پرداختند و مدلی جدید برای نفوذ پرتابه در صفحات با تغییر شکل‌های زیاد ارایه کردند. /یتاگکی و همکاران^[23]، به بررسی عمق نفوذ و شکل سوراخ در برخورد پرتابه با سرعت‌های خیلی بالا با دماغه‌های مختلف در اهداف آلومینیومی ضخیم پرداختند.

در این مقاله به بررسی تاثیر شکل دماغه پرتابه بر عمق نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک- آلومینیوم پرداخته شده است. پرتابه‌هایی با شکل‌های دماغه، تخت، اجایو و نیم‌کره از جنس فولاد و مورد آزمایش نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک- آلومینیوم قرار گرفته است. در این آزمایش از اهداف نیمه‌بی‌نهایت برای تعیین تاثیر شکل دماغه پرتابه بر عمق نفوذ استفاده شده است. ضمن انجام آزمایش تجربی، شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. با توجه به صحت نتایج شبیه‌سازی عددی، ضمن تعیین سرعت حد بالستیک برای هر کدام از پرتابه‌ها، تغییرات سرعت حد بالستیک آنها در مقابل تغییرات ضخامت پشتیبان و سرامیک نیز مشخص شده است.

۲- آزمایش تجربی

به‌منظور بررسی دقیق و عینی تاثیر شکل دماغه پرتابه بر عمق نفوذ در اهداف ترکیبی سرامیک- آلومینیوم، به ساخت قطعات، آماده‌سازی شرایط آزمایش و اجرای آن در آزمایشگاه ضربه و بالستیک پرداخته شده است.

۲-۱- ساخت پرتابه و هدف

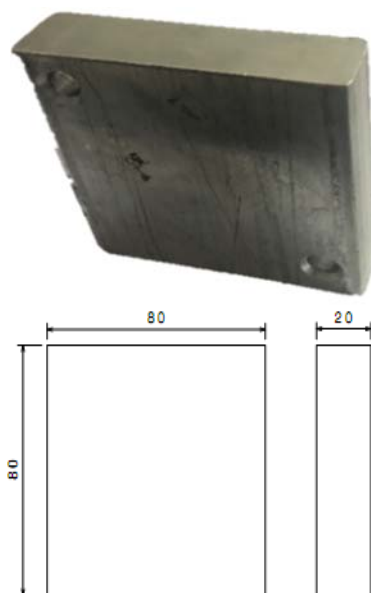
برای ساخت پرتابه از فولاد AISI 4340 (Hardness: 30 RC) استفاده شده است. در ابتدا قطعات فولادی توسط دستگاه تراش به شکل استوانه‌هایی با طول ۲۰ میلی‌متر و شعاع ۵ میلی‌متر آماده شده است. سپس با توجه به شکل دماغه پرتابه، هندسه مورد نظر روی آنها ایجاد شده است. در شکل ۱، نمایی از سه نوع پرتابه مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است. به‌منظور استفاده از این پرتابه‌ها در دستگاه تفنگ گازی با توجه به ابعاد لوله آن، نیاز بوده است تا یک سابوت (Sabot) در اطراف پرتابه قرار داده شود. در شکل ۲، ابعاد سابوت و نحوه قرارگیری پرتابه در آن نشان داده شده است. بدین ترتیب با جایگذاری پرتابه در سابوت و سپس قراردادن آنها در لوله تفنگ گاز سبک از حداکثر توان دستگاه برای بالابردن سرعت پرتابه استفاده می‌شود.



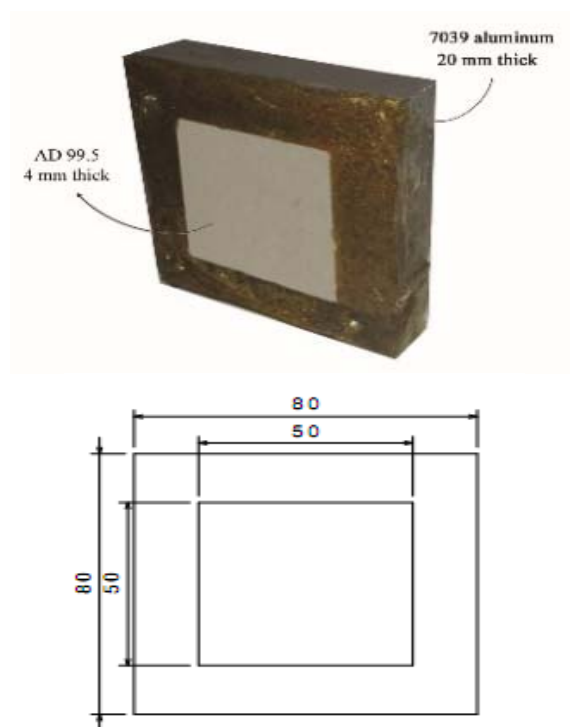
شکل ۱) نمایی از سه پرتابه با دماغه‌های مختلف

مورد نظر دارد. ون^[12]، به پیش‌بینی نفوذ پرتابه‌هایی با دماغه و سرعت‌های مختلف در اهداف کامپوزیتی پرداخت. سرعت حد بالستیک برای هر کدام از پرتابه‌ها را پیش‌بینی و با نتایج سایر محققین نیز مقایسه کرد. او با توجه به جنس هدف، پرتابه را به‌صورت صلب مدل نمود. شکریه و جو/دیپور^[13]، با بررسی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک- کولار، مقدار سرعت حد بالستیک و ضخامت بهینه هدف را تعیین کردند. آریاس و همکاران به بررسی عددی نفوذ قائم پرتابه با دماغه‌های مختلف در صفحات فولادی نازک پرداختند. آنها شبیه‌سازی عددی خود را در نرم‌افزار آباکوس و با در نظر گرفتن خواص پلاستیک و خرابی جانسون- کوک انجام دادند. در بررسی آنها که با پرتابه‌هایی با دماغه‌های تخت، مخروطی و نیم‌کره انجام شده بود، مشخص شد که کمترین سرعت حد بالستیک مربوط به پرتابه با دماغه تخت و بیشترین نیز مربوط به پرتابه با دماغه نیم‌کره بوده است^[14]. بابایی و همکاران^[15]، به بررسی مقاومت هدف‌های دولایه از جنس‌های آلومینیوم و فولاد با ترکیب‌های قرارگیری مختلف در مقابل نفوذ پرتابه با دماغه تخت پرداختند. سرعت حد بالستیک را برای ترکیب‌های مختلف از مقدار کم تا زیاد به‌صورت آلومینیوم- آلومینیوم، فولاد- آلومینیوم، آلومینیوم- فولاد و فولاد- فولاد به‌دست آوردند. رودریگز/میلان و همکاران^[16]، به بررسی مقاومت اهداف آلومینیومی با جنس‌های مختلف در مقابل نفوذ پرتابه‌هایی با دماغه‌های متفاوت پرداختند. آنها دریافتند که افزایش و کاهش مقاومت هدف به معنی کاهش و افزایش سرعت حد بالستیک (به‌ترتیب) نیست. یونفی و همکاران^[17]، عملکرد بالستیکی صفحات فولادی دولایه با جنس‌های مختلف را تحت ضربه با پرتابه‌هایی با جنس‌های یکسان و شکل‌های دماغه تخت و اجایو مورد بررسی تجربی قرار دادند. سرعت حد بالستیک برای پرتابه اجایو خیلی کمتر از مقدار آن برای پرتابه تخت بود. مهریانی و همکاران^[18]، به بررسی تجربی تاثیر شکل دماغه و سرعت اولیه آنها بر عملکرد بالستیکی اهداف چندلایه شیشه/اپوکسی با الیاف بافته‌شده، پرداختند. آنها دریافتند که بهترین عملکرد بالستیکی را پرتابه اجایو و بدترین عملکرد بالستیکی را پرتابه با دماغه تخت دارد. ونکتسن و همکاران^[19] به بررسی عملکرد بالستیکی دو نوع هدف ترکیبی، سرامیک آلومینا- آلومینیوم و سرامیک سیلیکون کارباید- آلومینیوم در مقابل نفوذ دو نوع پرتابه با دماغه‌های تخت و اجایو پرداختند. نتیجه مهم در این بررسی، تاثیر بسیار زیاد شکل دماغه پرتابه بر عملکرد بالستیکی هدف است. آنها دریافتند که سرامیک با جنس سخت‌تر باعث فرسایش بیشتر پرتابه می‌شود و همچنین اختلاف سرعت باقی‌مانده برای دو پرتابه با دماغه‌های تخت و اجایو در این سرامیک کمتر است. /کرامی و همکاران^[20]، به بررسی ضربه سقوط آزاد پرتابه با دماغه‌های مختلف روی اهداف گلوله نوع ۳ به‌صورت تجربی پرداختند. آنها دریافتند که بیشترین و کمترین مقدار نیروی تماس و انرژی جذب‌شده توسط هدف، به‌ترتیب در برخورد پرتابه تخت و مخروطی ۹۰ درجه ایجاد می‌شوند. میرزا/بابایی و همکاران^[21]، به بررسی تجربی و تحلیلی

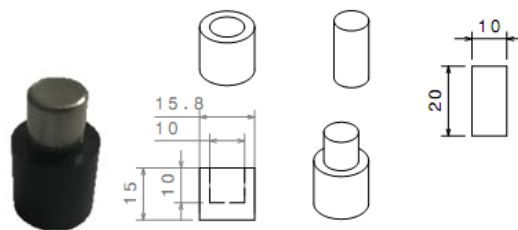
به منظور اتصال سرامیک به آلومینیوم از چسب اپوکسی (Epoxy) استفاده شده است. ابتدا سطوح به دقت تمیز شده و سرامیک روی آلومینیوم و در وسط آن قرار داده می شود. ضخامت این چسب در بین سرامیک و آلومینیوم در حدود ۰/۲ میلی متر اندازه گیری شده است. با چسب نواری یک حصار چند سانتی متری روی لبه های خارجی آلومینیوم درست شده است. فضای بین سرامیک و این حصار با چسب پاتکس (Pattex) کاملاً پر می شود تا از حرکت سرامیک جلوگیری کند. در شکل ۴، نمای کلی هدف نشان داده شده است.



شکل ۳) نمایی از بلوک آلومینیومی و ابعاد آن به میلی متر



شکل ۴) نمایی از هدف ترکیبی سرامیک- آلومینیوم و ابعاد آن به میلی متر



شکل ۵) نمای کلی از پرتابه تخت و سابوت و ابعاد آنها

برای ساخت هدف ترکیبی از دو جنس سرامیک و آلومینیوم استفاده شده است. برای ساخت سرامیک از جنس آلومینا، مواد اولیه به صورت سرامیک خام فشرده از شرکت آلومین سرام نگین شهر یزد تهیه شده است. سپس این سرامیک های خام در ابعاد مورد نظر به کمک دستگاه سی ان سی، برش زده شده است. سپس سرامیک های برش خورده برای پخت و تکمیل فرآیند ساخت، به شرکت آلومین سرام نگین فرستاده شده است.

بعد از آماده سازی سرامیک، به منظور تعیین خواص آن، نمونه ای از سرامیک ها به آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی برای تعیین ترکیب شیمیایی و درصد ترکیب وزنی مواد تشکیل دهنده آن فرستاده شده است. ترکیب شیمیایی مواد تشکیل دهنده سرامیک به روش XRD، شامل Al_2O_3 ، Al_2MgO_4 و Ca_2Si است. در جدول ۱ به روش XRF درصد وزنی مواد تشکیل دهنده سرامیک نشان داده شده است. با این آزمایش ها مشخص شد که سرامیک مورد نظر، آلومینا ۹۹/۵٪ است.

جدول ۱) درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل دهنده سرامیک به روش XRF

شماره	ترکیب شیمیایی	درصد وزنی
۱	Na_2O	۰/۰۴
۲	SO_3	<۰/۰۱
۳	Fe_2O_3	۰/۰۵
۴	MgO	۰/۱
۵	Cl	<۰/۰۱
۶	$L.O.I$	۰/۰
۷	Al_2O_3	۹۹/۴
۸	K_2O	۰/۲
۹	$La\&Lu$	<۰/۰۱
۱۰	SiO_2	۰/۱
۱۱	CaO	۰/۰۹
۱۲	P_2O_5	<۰/۰۱
۱۳	Cr_2O_3	۰/۰۱

فلز مورد نظر برای پشتیبان، آلومینیوم (Hardness: Al 7039 (76 RB) است. این آلومینیوم با توجه به نرم بودن و در دسترس بودن انتخاب شده است. شرایط هدف، نیمه بی نهایت انتخاب شد تا عمق نفوذ، مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین ترتیب پس از تهیه ورق آلومینیوم با ضخامت مورد نظر به کمک دستگاه برش، بلوک های آلومینیومی در ابعاد مورد نظر به دست آمده است. در شکل ۳، نمایی از این بلوک ها همراه با ابعاد آنها، نشان داده شده است.

۲-۲- ساخت قاب

برای قراردادن هدف در محفظه دستگاه تفنگ گازی نیاز است تا قاب مناسبی طراحی شود. این قاب باید علاوه بر ابعاد مناسب برای قرارگرفتن در دستگاه، استحکام کافی نیز داشته باشد تا طی برخورد پرتابه به هدف، بدون تغییر شکل، جابجایی و لغزش باشد. در شکل ۵، نمایی از قاب ساخته شده، نشان داده شده است. قاب اولیه به علت نازک بودن، استحکام کافی نداشت؛ اما قاب سمت چپ، شکل نهایی مورد استفاده در آزمایش است که شرایط مورد نظر را نیز برآورده کرده است. این قاب‌ها در محفظه دستگاه تفنگ گازی و بین دو فک دستگاه ثابت و بدون حرکت قرار داده می‌شوند.



شکل ۶) دستگاه تفنگ گازی در آزمایشگاه ضربه و بالستیک

جدول ۲) مشخصات پرتابه و هدف و نتایج آزمایش تجربی

شماره آزمایش	شکل دماغه پرتابه	جرم هدف (g)	جرم پرتابه (g)	جرم سابت (g)	سرعت برخورد (m/s)	عمق نفوذ در پشتیبان (mm)
۱	تخت	۳۷۶	۱۲/۰۲	۲/۰۳	۳۸۵	۵/۱۰
۲	تخت	۳۷۵	۱۲/۰۷	۲	۴۰۲	۵/۴۵
۳	تخت	۳۷۵	۱۲	۲/۰۱	۲۰۵	-
۴	اجایو	۳۷۵	۸/۹	۲/۰۵	۳۰۶	-
۵	اجایو	۳۷۷	۹	۲/۰۳	۳۳۰	-
۶	اجایو	۳۷۶	۸/۹۵	۲/۰۳	۳۹۵	۱/۸۰
۷	اجایو	۳۷۷	۹/۰۱	۲	۴۰۱	۱/۸۵
۸	نیم کره	۳۸۰	۱۰/۵	۲	۳۲۶	-
۹	نیم کره	۳۷۶	۱۱/۰۲	۲/۰۱	۴۰۵	۲/۶۰
۱۰	نیم کره	۳۷۶	۱۱/۰۱	۲/۰۱	۳۹۸	۲/۵۵



(a)

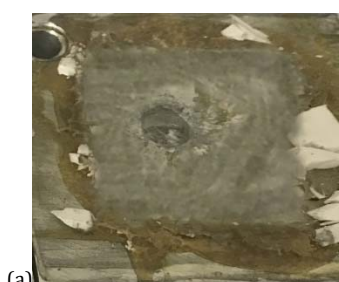


(b)

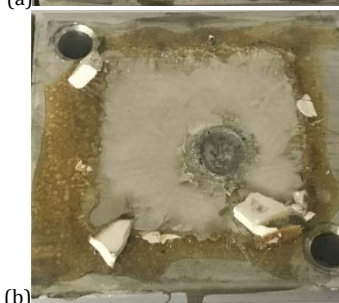
شکل ۵) نمایی از قاب مورد استفاده برای ثابت نگه داشتن هدف؛ قاب اولیه (a) و قاب نهایی (b)

۳-۲- انجام آزمایش و نتایج آن

به منظور انجام آزمایش تجربی در آزمایشگاه مکانیک ضربه و بالستیک از دستگاه تفنگ گازی که در شکل ۶ نشان داده شده است، استفاده شد. در ۱۰ نمونه آزمایشی که به کمک این دستگاه انجام شد، ۴ نمونه برای ارزیابی اولیه و کیفی شرایط آزمایش و تعداد ۶ نمونه مورد ارزیابی نهایی قرار گرفت که نتایج آنها در جدول ۲ آمده است. در این آزمایش‌ها از فشار ۱۲۰ بار به کمک گاز هوای فشرده در کپسول استفاده شده است. در شکل ۷، نیز نمایی از عمق نفوذ پرتابه‌ها در پشتیبان نشان داده شده است. از آنجایی که حداکثر سرعت پرتابه (با توجه به این فشار) حدود ۴۰۰ متر بر ثانیه است و این سرعت برای نفوذ در هدف، یک سرعت اولیه محسوب می‌شود، بنابراین امکان انجام آزمایش‌های بیشتر و تعیین عمق نفوذهای متنوع‌تر وجود نداشت. به منظور بررسی بیشتر و تعیین دقیق‌تر رفتار هر کدام از پرتابه‌ها در برخورد با اهداف ترکیبی سرامیک- فلز، در ادامه از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است.



(a)



(b)

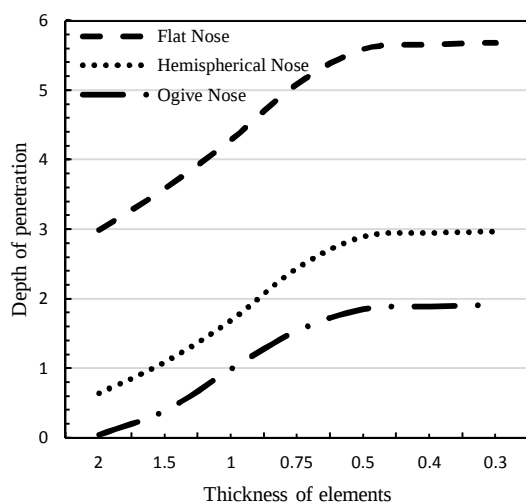


(c)

شکل ۷) عمق نفوذ در پشتیبان به وسیله پرتابه با دماغه تخت (a)، نیم کره (b) و اجایو (c)

۳- شبیه‌سازی عددی

اجسام تغییر شکل‌پذیر مدل شده و مش مورد نظر ساختار نیز از نوع المان خطی چهاروجهی جامد (C3D4) انتخاب شده است. به‌منظور بررسی همگرایی خروجی نرم‌افزار، اندازه دانه‌بندی به‌صورت ۵٪ در جهت ضخامت برای هر کدام از پرتابه‌ها، مطابق نمودار ۱ انتخاب شده است. در این نمودار سرعت برخورد ۴۰۰ متر بر ثانیه است.



نمودار ۱) بررسی حساسیت به مش با تغییر اندازه المان‌ها و اندازه‌گیری عمق نفوذ در پشتیبان فلزی

۲-۳- مدل‌سازی رفتار هدف و پرتابه

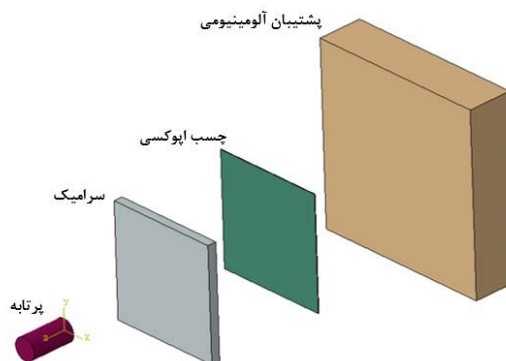
به‌منظور مدل‌سازی رفتار پرتابه و هدف و اهمیت تحلیل آنها، باید شرایط را در لحظه برخورد به‌صورت کامل و دقیق در نظر گرفت. با توجه به اینکه سرعت اولیه پرتابه بالا است، باید رفتار ماده را به‌صورت وابسته به نرخ کرنش در نظر گرفت. انرژی اولیه پرتابه پس از برخورد به هدف، صرف تغییر شکل و آزاد شدن گرما می‌شود؛ لذا دمای منطقه برخورد به‌صورت موضعی افزایش یافته و سبب نرم‌شدن موضعی فلز در منطقه برخورد می‌شود؛ بنابراین رفتار مکانیکی پرتابه و هدف به دما نیز وابسته است. به همین دلیل از معادله جانسون- کوک برای مدل‌کردن رفتار پرتابه و پشتیبان و معادله پلاستیسیته دراکر- پراگر (Drucker- Prager) و معادله حالت مای- گرونیزن (Mie- Gruneisen) برای مدل‌کردن رفتار سرامیک استفاده شده است.

رفتار پرتابه و هدف به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که المان‌ها در صورت افزایش مقدار انرژی آنها از سطح ماده حذف شوند. به این منظور از مدل گسیختگی جانسون- کوک (Johnson- Cook) استفاده شده است. این مدل قابلیت پیش‌بینی شروع شکست یا گسیختگی را دارا است. یک معیار نیز برای المان‌هایی که پس از شروع گسیختگی دچار پارگی می‌شوند، در نظر گرفته شده است. این معیار اجازه می‌دهد که برخی از المان‌ها پس از پایان گسیختگی از مدل حذف شوند. مدل جانسون- کوک برای ناحیه پلاستیک از رابطه (۱) به‌دست می‌آید [24, 25].

نفوذ پرتابه در هدف یکی از فرآیندهای پیچیده مکانیکی است. فرسایش پرتابه و هدف، تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک پرتابه و هدف، جذب انرژی پرتابه توسط هدف، اتلاف حرارتی و غیره از جمله فرآیندهایی هستند که طی نفوذ پرتابه در هدف باید در نظر گرفته شوند. برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار، ابتدا شرایط آزمایش تجربی، مدل‌سازی و اجرا شده است. سپس سرعت حد بالستیک برای هر کدام از پرتابه‌ها و تغییرات سرعت حد بالستیک در مقابل ضخامت پشتیبان و سرامیک مشخص شده است.

۱-۳- هندسه، شرایط مرزی و حساسیت به مش

مدل‌سازی پرتابه و هدف، مطابق آزمایش‌های تجربی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. با توجه به هندسه پرتابه و هدف و شرایط بارگذاری و مرزی از قید تقارن استفاده شده و نیمی از هدف و پرتابه مدل شده است. در شکل ۸، نمایی از مدل هدف و پرتابه در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. با توجه به گیرداربودن هدف در آزمایش تجربی، در اینجا نیز اطراف هدف به‌صورت گیردار مدل‌سازی شده است. چسب اطراف سرامیک روی آلومینیوم، شرایط مرزی گیردار را در اطراف سرامیک ایجاد می‌کند. بنابراین در شبیه‌سازی از مدل‌کردن آن صرف‌نظر شده و فقط شرایط گیردار در اطراف سرامیک تعریف شده است. توجه به اینکه سابوت تنها برای پرکردن فاصله بین پرتابه و لوله تفنگ گازی است، بنابراین جنس آن از پلاستیک و قابل تغییر شکل است. بعد از انفجار گازها، موج انفجار به این پلاستیک رسیده و حداکثر انرژی به پرتابه منتقل می‌شود. با توجه به جنس سابوت، بعد از این انتقال انرژی از بین رفته و از اطراف پرتابه حذف می‌شود؛ بنابراین پرتابه بدون سابوت به هدف رسیده است. تنها نقش سابوت افزایش انرژی جنبشی پرتابه و در نتیجه سرعت آن است. بنابراین در شبیه‌سازی عددی، سرعت مورد نظر به پرتابه داده شده و از مدل‌کردن آن صرف‌نظر شده است.



شکل ۸) پرتابه با دماغه تخت و هدف ترکیبی سرامیک- آلومینیوم در آباکوس

با رفتار پرتابه و هدف در نتایج نهایی بسیار اهمیت دارد. این رفتار با مش مناسب معنا و مفهوم پیدا می‌کند. پرتابه و هدف به‌صورت

دارد. به‌منظور ساده‌سازی از فرم خطی معادله حالت بدون مشارکت انرژی استفاده شده است. فرم این معادله که به $U_s - U_p$ معروف است، در رابطه (۵) آمده است.

$$P = P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (۵)$$

$$\eta = 1 - \rho_0 / \rho$$

ρ_0 چگالی، c_0 و s پارامترهای ثابت ماده هستند. پارامترهای ماده مربوط به مدل پلاستیسیته دراکر- پراگر و معادله حالت مای-گرونینز برای آلومینا در جدول ۵ آمده است. با داشتن ثابت‌های معادله جانسون- هالمکوئیست (Johnson-Holmquist) برای سرامیک آلومینا ۹۹/۵٪ از مرجع [28] و جایگذاری در روابط ۶ تا ۱۰، اعداد جدول ۵ به‌دست آمده است.

$$a = \frac{P_{HEL}}{(A \times \sigma_{HEL})^{\frac{1}{N}}} \quad (۶)$$

$$b = \frac{1}{N} \quad (۷)$$

$$T = a\sigma_c^b - \frac{\sigma_c}{3} \quad (۸)$$

$$K_1 = \rho_0 c_0^2 \quad (۹)$$

$$K_2 = \rho_0 c_0^2 (2s - 1) \quad (۱۰)$$

در این روابط، P_{HEL} فشار حد الاستیک هاگونیت؛ σ_{HEL} مقاومت حد الاستیک هاگونیت؛ σ_c تنش تسلیم فشاری؛ T تنش تسلیم کششی و K_1 ، K_2 و A و N نیز ثابت‌های معادله هستند.

به‌منظور مدل‌سازی چسب اپوکسی و با درنظرگرفتن مقاومت کم آن، می‌توان رفتار آن را همانند یک سیال فرض نمود که در برابر فشار مقاومت دارد. مدل ساختاری پلاستیک سینماتیک برای آن در نظر گرفته شده است. در جدول ۶، خواص مربوط به چسب اپوکسی آمده است.

به‌منظور حذف المان‌ها حین نفوذ پرتابه در هدف از انرژی شکست استفاده شده است. المانی که گسیختگی در آن شروع شده است، همانند یک ترک است که در بخشی از قطعه قرار گرفته است. برای رشد ترک در یک آلیاژ خاص، یک مقدار مشخصی انرژی لازم است که به آن انرژی در واحد سطح می‌گویند. بنابراین با شروع گسیختگی در یک المان، آن المان حذف نمی‌شود، بلکه زمانی که مقدار انرژی دریافت‌شده آن به اندازه انرژی شکست برسد، آن المان کاملاً حذف خواهد شد. مقدار انرژی شکست برای آلیاژهای آلومینیوم عددی بین ۷۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ ژول بر متر مربع است؛ اما زمانی که این آلیاژها تحت نرخ کرنش‌های بسیار زیاد (مانند مدل این مقاله) قرار گیرند، شکست کاملاً ترد خواهند داشت و مقدار انرژی شکست آنها کمتر از ۵۰۰ ژول بر متر مربع خواهد بود.

جدول ۵ پارامترهای معادله دراکر- پراگر و معادله حالت مای- گرونینز برای سرامیک آلومینا ۹۹/۵٪

E_F	Γ_0	G (GPa)	ρ_0 (kg/m ³)	c_0 (m/s)	s	σ_c (MPa)	b	a
۰	۰	۱۳۵	۳۸۰۰	۷۲۵۴/۷۶	۰/۵	۵۱۶۵/۴۷	۲/۶۶	۰/۲۴۹۴

$$\sigma^{pl} = [A + B(\sigma^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 - \hat{\theta}^m] \quad (۱)$$

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & : \theta < \theta_{Tran} \\ \frac{\theta - \theta_{Tran}}{\theta_{melt} - \theta_{Tran}} & : \theta_{Tran} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & : \theta > \theta_{melt} \end{cases}$$

در این رابطه، θ دمای فلز، θ_{melt} دمای ذوب فلز و θ_{Tran} دمایی است که دماهای کمتر از آن تأثیری بر تنش سیلان فلز نخواهد داشت. $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنشی است که مقادیر A ، B و n در آن نرخ، اندازه‌گیری می‌شوند. این سه ثابت با آزمون کشش استاتیکی تعیین می‌شوند و به همین دلیل به آنها ثوابت شبه‌استاتیکی می‌گویند. ثوابت c و m توسط آزمون‌های پیچش در نرخ کرنش‌ها و دماهای متفاوت و آزمون فشار میله هایپکینسون (Hopkinson Bar) تعیین می‌شوند. در جدول ۳، مقادیر معادله جانسون- کوک واردشده در نرم‌افزار برای پرتابه و فلز پشتیبان آورده شده است. معیار گسیختگی جانسون- کوک نیز برای فولاد و آلومینیوم از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [25].

$$\epsilon_{pl}^D = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 \hat{\theta}] \quad (۲)$$

ϵ_{pl}^D کرنش مربوط به شروع تخریب، D_1 تا D_5 ضرایب ثابت مربوط به آزمایش، η نسبت سه محوره‌بودن تنش (Triaxiality Stress)، $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک، $\hat{\theta}$ نرخ کرنش مربوط به اندازه‌گیری ثابت‌های آزمایش و دمای فلز است. ثابت‌های پارگی جانسون- کوک برای پرتابه و آلومینیوم در جدول ۴ آمده است. برای مدل‌سازی رفتار سرامیک از معادله دراکر- پراگر استفاده شده است. فرم نمایی کلی این معادله به‌صورت رابطه (۳) است.

$$\sigma = \frac{1}{a^{1/b}} (P + P_t)^{1/b} \quad (۳)$$

که در آن P و P_t به‌ترتیب فشار واقعی و ماکزیمم فشار کششی است. a و b نیز پارامترهای ثابت ماده هستند.

جدول ۳ ثابت‌های معادله جانسون- کوک برای پشتیبان و پرتابه [26]

جنس	A (MPa)	B (MPa)	n	c	m	$\dot{\epsilon}_0$	T_{trans} (0 _c)
Al 7039 (Hardness: 76 RB)	۳۳۷	۳۴۳	۰/۴۱	۰/۰۱	۱	۱	-
AISI 4340 (Hardness: 30 RC)	۷۹۲	۵۱۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴	۱/۰۳	۱	۲۷

جدول ۴ ثابت‌های پارگی معادله جانسون- کوک برای پشتیبان و پرتابه [27]

جنس	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Al 7039 (Hardness: 76 RB)	۰/۱۴	۰/۱۴	-۱/۵	۰/۰۱۸	۰
AISI 4340 (Hardness: 30 RC)	۰/۰۵	۳/۴۴	-۲/۱۲	۰/۰۰۲	۰/۶۱

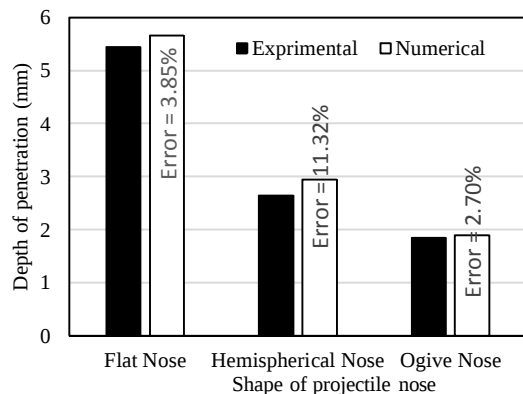
برای توصیف رفتار هیدرودینامیک سرامیک از معادله حالت مای-گرونینز استفاده شده است. فرم کلی این معادله (که نسبت به انرژی خطی است) به‌صورت رابطه (۴) است.

$$P - P_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (۴)$$

E_H و P_H به‌ترتیب فشار و انرژی هاگونیت (Hugoniot) بر واحد جرم بوده که تنها تابعی از دانسیته هستند. Γ ، نسبت گرونینز نام

E (GPa)	G (GPa)	ρ_0 (kg/m ³)	ν	c (m/s)	σ_c (MPa)	EFFEPS
۴/۴۸	۱/۶	۱۱۹۰	۰/۴	۲۷۳۰	۴۵	۱/۵

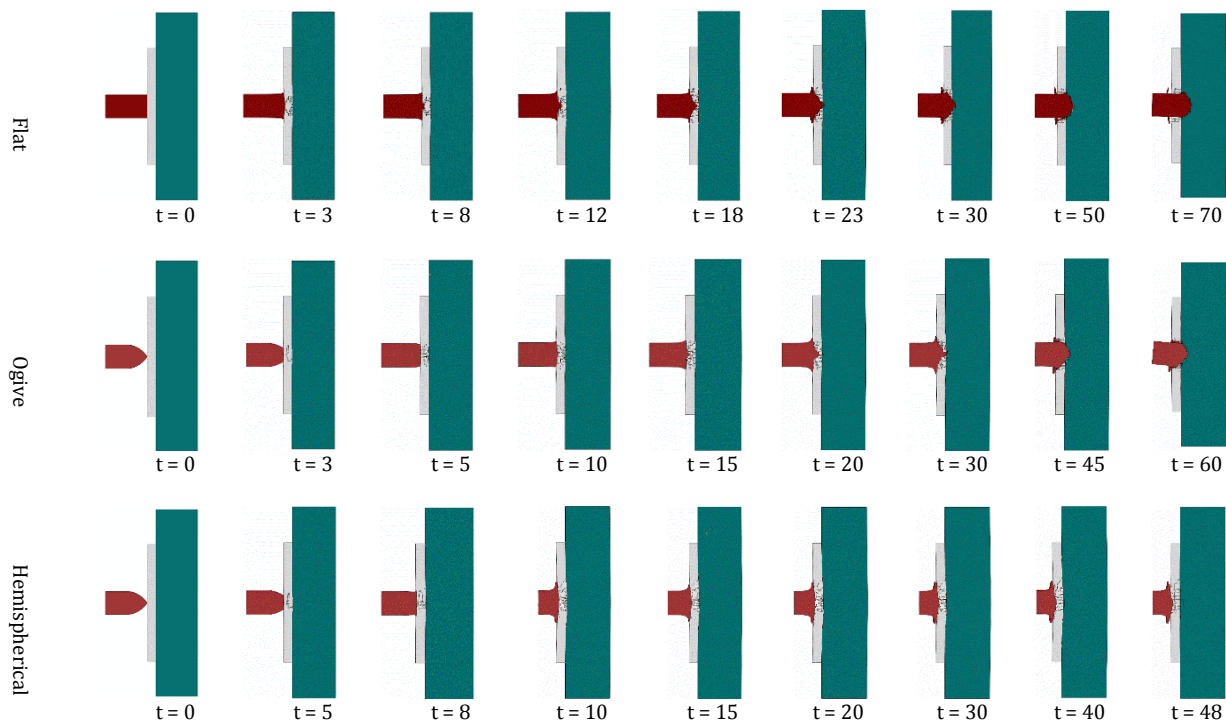
محدودیت بوده و چهار طرف هدف به علت عدم حرکت، کاملاً مقید شده است. در نمودار ۲، این نتایج با هم مقایسه شده است. در شکل ۹، مراحل نفوذ پرتابه‌ها در هدف نشان داده شده است.



نمودار ۲) مقایسه عمق نفوذ با تغییر شکل دماغه پرتابه در نتایج تجربی و عددی

۳-۳- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی

برای بررسی اعتبار نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس از نتایج آزمایش‌های تجربی استفاده شده است. تمامی شرایط آزمایش‌های تجربی در نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی شده است. در شبیه‌سازی عددی، مدل هندسی پرتابه و هدف به‌صورت سه‌بعدی و به‌منظور کاهش محاسبات با توجه به متقارن بودن مساله، یک‌دوم آنها مدل شده است. ابعاد مش مدل هندسی، با توجه به حساسیت مش مقدار اندازه دانه‌بندی ۰/۵ در ضخامت و از نوع المان خطی چهاروجهی جامد انتخاب شده است. نوع تماس بین پرتابه و هدف از نوع فرسایشی است. این نوع تماس از طریق سابروتین‌نویسی در نرم‌افزار وارد شده است. این تماس امکان نفوذ پرتابه در هدف و حذف المان‌های آنها را می‌دهد. حرکت پرتابه بدون



شکل ۹) مراحل نفوذ پرتابه‌هایی با سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه و دماغه‌های تخت، اجایو، نیم‌کره در اهداف ترکیبی سرامیک- فلز (زمان بر حسب میکرو ثانیه)

برای هر سه نوع پرتابه، نشان داده شده است. در نمودار ۵، تاثیر ضخامت چسب بر عمق نفوذ بررسی شده است. در این بررسی پرتابه از نوع سرتخت و سرعت برخورد ۴۰۰ متر بر ثانیه است.

جدول ۷) سرعت حد بالستیک برای سه نوع پرتابه

شکل دماغه پرتابه	تخت	اجایو	نیم‌کره
سرعت حد بالستیک (m/s)	۶۵۰	۸۲۰	۷۱۰

۴-۳- توسعه شبیه‌سازی عددی

با اطمینان از صحت خروجی‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار آباکوس، امکان انجام شبیه‌سازی‌های بیشتر برای بررسی دقیق‌تر میزان عمق نفوذ پرتابه در هدف فراهم شده است. در جدول ۷، سرعت حد بالستیک برای هر کدام از پرتابه‌ها برای هدف ترکیبی مورد آزمایش، مشخص شده است. در نمودارهای ۳ و ۴ به‌ترتیب تغییرات سرعت حد بالستیک در مقابل تغییرات ضخامت فلز پشتیبان و سرامیک

۱- با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده نفوذ پرتابه‌ها در اهداف ترکیبی سرامیک- فلز، رابطه مستقیمی با شکل دماغه و سرعت برخورد آنها دارد. به‌طوری‌که فرآیند نفوذ در این اهداف کاملاً بانفوذ در اهداف فلزی متفاوت است و شرایط پیچیده و متنوعی دارد.

۲- نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی از مطابقت خوبی برخوردار بوده است. تغییر شکل‌های پرتابه و هدف نیز در فرآیند شبیه‌سازی عددی مشابه آزمایش‌های تجربی بوده است.

۳- پرتابه تخت بیشترین عمق نفوذ و پرتابه اجابو کمترین عمق نفوذ را در هدف ترکیبی سرامیک- فلز داشته است.

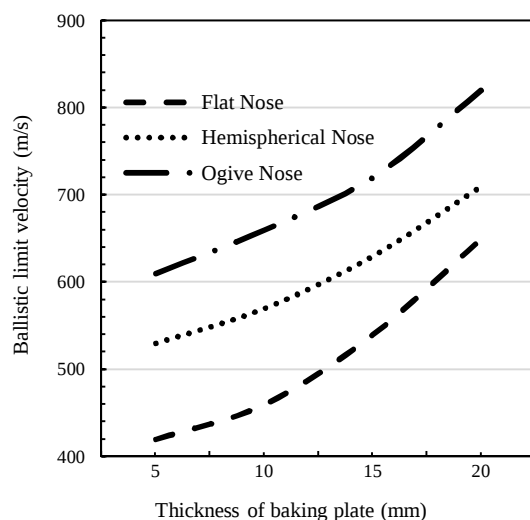
۴- در لحظه برخورد پرتابه سر تخت به سطح سرامیک، نیروی دینامیکی که در سطح مقطع پرتابه وجود دارد، باعث ایجاد نیروی مضاعف و گسترده‌ای در سطح سرامیک می‌شود و به دلیل اینکه سرامیک از استحکام فشاری زیادی برخوردار است، در برابر این نیرو عکس‌العمل نشان داده و مقاومت می‌کند. در اثر این مقاومت، ارتعاشاتی در سرامیک ایجاد می‌شود که در نتیجه آن، سرامیک به دلیل اینکه استحکام کششی خیلی کمتری نسبت به استحکام فشاری خود دارد، توان مقاومت در برابر این نیروی دینامیکی رفت و برگشتی را ندارد و باعث ایجاد ترک‌های شعاعی در سطح آن می‌شود. هرچه سطح مقطع پرتابه بزرگ‌تر باشد، این نیرو بیشتر و ترک‌های شعاعی نیز بیشتر می‌شود و با ایجاد یک ترک مخروطی‌شکل در سرامیک، پرتابه شروع به نفوذ در عمق هدف می‌نماید.

۵- هرچه سطح مقطع پرتابه سرتخت افزایش یابد، نیروی دینامیکی که به سطح سرامیک اعمال می‌کند، بزرگ‌تر شده و بیشتر در سرامیک نفوذ می‌کند؛ در این حالت سرعت حد بالستیک نیز کمتر می‌شود.

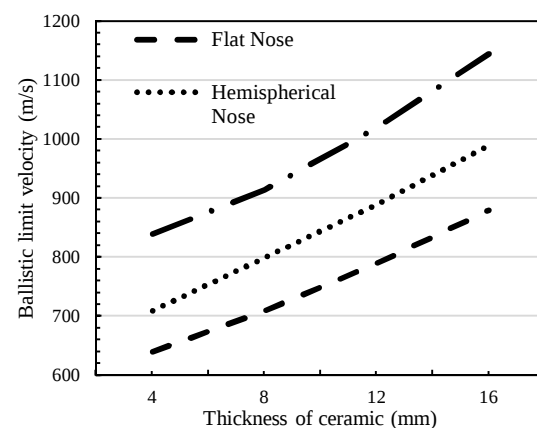
۶- سایش پرتابه تخت کمترین و پرتابه اجابو بیشترین است. در لحظه برخورد پرتابه تخت، سطح مقطع بزرگ‌تری از پرتابه با سرامیک در تماس است؛ بنابراین نیروی عکس‌العمل نیز روی این سطح توزیع می‌شود. در حالی که در لحظه برخورد پرتابه اجابو ضمن کوچک‌بودن این سطح، ماده کمتری هم در قسمت جلوی پرتابه وجود دارد و احتمال خرابی (سایش) آن نیز بیشتر است.

۷- هرچه سرعت برخورد بیشتر باشد، ترک مخروطی‌شکل کوچک‌تر و دارای زاویه رأس کمتر هست و در هنگام فرآیند نفوذ، خرده‌های سرامیک از اطراف پرتابه به بیرون می‌جهند و هرچه سرعت برخورد کمتر باشد، ترک مخروطی ایجادشده بزرگ‌تر و زاویه رأس آن بیشتر می‌شود و هنگام فرآیند نفوذ، خرده‌های سرامیک همراه پرتابه به داخل هدف نفوذ می‌کنند.

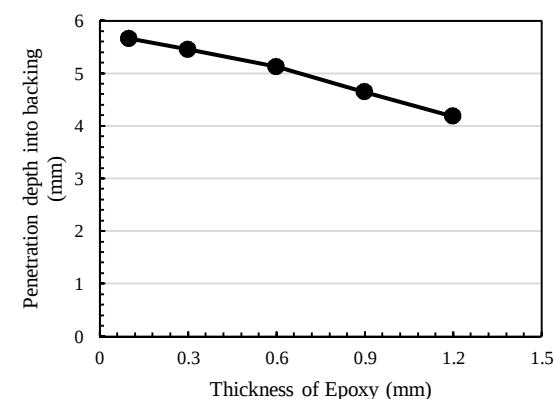
۸- در لحظه برخورد پرتابه با دماغه اجابو یا نیم‌کره به سطح سرامیک، نیروی دینامیکی پرتابه فقط در قسمتی از نوک پرتابه متمرکز شده و ایجاد تنش محوری می‌کند که استحکام فشاری سرامیک به‌خوبی با آن تنش مقاومت می‌کند و باعث پلاستیک‌شدن و سایش دماغه، اتلاف انرژی دینامیکی، کوتاه‌شدن پرتابه و کاهش سرعت آن می‌شود و از این لحظه به بعد است که در صورت داشتن سرعت و



نمودار ۳) تغییرات سرعت حد بالستیک در مقابل تغییرات ضخامت فلز پشتیبان (ضخامت سرامیک ۴ میلی‌متر)



نمودار ۴) تغییرات سرعت حد بالستیک در مقابل تغییرات ضخامت سرامیک (ضخامت فلز پشتیبان ۲۰ میلی‌متر)



نمودار ۵) تغییرات عمق نفوذ در پشتیبان فلزی در مقابل تغییرات ضخامت چسب

۴- بررسی نتایج و بحث

در این بخش به بررسی نتایج تجربی و عددی و بحث روی آنها پرداخته شده است.

شد و مشخص شد که سرعت حد بالستیک در پرتابه اجایو بیشترین و در پرتابه تخت کمترین است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.
تعارض منافع: این مقاله هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: مصطفی سیاح بادخور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه / پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ علیرضا نداف اسکویی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ دانیال کاشانی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ مهدی آقاملاطهرانی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۱۰٪)
منابع مالی: کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1- Florence AL, Ahrens TJ. Interaction of projectiles and composite armor. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center; 1967.
- 2- Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1967;15(6):387-399.
- 3- Wilkins ML. Mechanics of penetration and perforation. International Journal of Engineering Science. 1978;16(11):793-807.
- 4- Backman ME, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. International Journal of Engineering Science. 1978;16(1):1-99.
- 5- Rozenberg Z, Yeshurun Y. The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles. International Journal of Impact Engineering. 1988;7(3):357-362.
- 6- Woodward RL. A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. International Journal of Impact Engineering. 1990;9(4):455-474.
- 7- Den Reijer PC. Impact on ceramic faced armour [Dissertation]. Delft: Delft University of Technology; 1991.
- 8- Zaera R, Sanchez-Galvez V. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. International Journal of Impact Engineering. 1998;21(3):133-148.
- 9- Chocron Benloulou IS, Sanchez-Galvez V. A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armours. International Journal of Impact Engineering. 1998;21(6):461-471.
- 10- Fellows NA, Barton PC. Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour. International Journal of Impact Engineering. 1999;22(8):793-811.
- 11- Zaera R, Sánchez-Sáez S, Pérez-Castellanos JL, Navarro C. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2000;31(8):823-833.
- 12- Wen HM. Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with

نیروی کافی، همانند یک پرتابه سرتخت عمل کرده و باعث تخریب سرامیک و نفوذ در هدف می‌شود.

۹- سرعت حد بالستیک در پرتابه اجایو بیشترین و در پرتابه تخت کمترین است. این حالت پیش‌آمده کاملاً برعکس نفوذ در اهداف فلزی است. پرتابه تخت نیروی بیشتر و سایش کمتری دارد، بنابراین برای نفوذ کامل در هدف ترکیبی سرامیک- فلز به سرعت کمتری هم نیاز خواهد داشت.

۱۰- با افزایش ضخامت پشتیبان، سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. این افزایش ضخامت از ارتعاشات ضربه جلوگیری کرده و استحکام هدف را بالا می‌برد و در نتیجه سرامیک دیرتر ترک می‌خورد. وزن، ضخامت و هزینه نهایی ساخت هدف افزایش می‌یابد.

۱۱- با افزایش ضخامت لایه سرامیک، سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. این افزایش ضخامت، باعث فرسایش بیشتر پرتابه‌ها و کاهش قدرت نفوذ آنها می‌شود؛ در این حالت، وزن، ضخامت و هزینه نهایی ساخت هدف افزایش می‌یابد.

۱۲- افزایش ضخامت سرامیک، اختلاف بین سرعت‌های حد بالستیک در این سه نوع پرتابه را نیز افزایش می‌دهد. علت این اختلاف، سرعت بیشتر سایش در پرتابه اجایو نسبت به پرتابه تخت است؛ یا به عبارت دیگر، اختلاف طول باقی‌مانده پرتابه‌های اجایو و تخت با افزایش ضخامت سرامیک، بیشتر می‌شود.

۱۳- شکل موج حرکتی داخل هدف بعد از برخورد پرتابه اجایو و نیم‌کره در ابتدای برخورد به صورت نیم‌دایره است. با گذشت زمان و نفوذ بیشتر پرتابه، شکل این موج شبیه برخورد پرتابه تخت شده است. در واقع با گذشت زمان از لحظه برخورد این دو پرتابه با هدف، سایش نوک آنها به علت سختی بالای سرامیک بیشتر می‌شود. بنابراین بعد از گذشت زمان از لحظه برخورد نوک هر سه پرتابه مثل هم شده است که در نتیجه شکل موج حرکتی در داخل هدف نیز یکسان خواهد بود.

۱۴- با افزایش ضخامت چسب، مقدار عمق نفوذ کاهش پیدا می‌کند. در ضخامت‌های کم این کاهش کمتر از ضخامت‌های زیاد آن است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی تأثیر دماغه پرتابه بر عمق نفوذ در اهداف نیمه‌بی‌نهایت پرداخته شده است. سرامیک با توجه به سختی بالا موجب سایش پرتابه می‌شود. شکل دماغه پرتابه روی مقدار این سایش و در نتیجه عمق نفوذ در هدف تأثیر دارد. ضمن انجام آزمایش‌های تجربی به کمک شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار آباکوس نیز عمق نفوذ پرتابه با دماغه‌های مختلف در هدف، مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط یکسان، پرتابه تخت بیشترین عمق نفوذ و پرتابه اجایو کمترین عمق نفوذ را در هدف ترکیبی سرامیک- فلز داشته است. سرعت حد بالستیک نیز به عنوان یک پارامتر قابل ارزیابی در نرم‌افزار آباکوس برای شکل‌های مختلف دماغه پرتابه در مقابل ضخامت‌های متفاوت پشتیبان و سرامیک مورد ارزیابی واقع

monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2017;112:118-124.

22- Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M. Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2016;107:257-265.

23- Itagaki Y, Tamura H, Watanabe Y, Taniyama K, Takashima A. Effects of head shape of projectiles on hypervelocity impact cratering on aluminum 5052 alloy targets at 7 km/s. *International Journal of Impact Engineering*. 2019;123:38-47.

24- Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. 7th International Symposium on Ballistics, 1983 April 19-21, the Hague, the Netherlands. Unknown Publisher; 1983. pp. 541-547.

25- Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985;21(1):31-48.

26- Alipour R, Najarian F. A FEM study of explosive welding of double layer tubes. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2011;5(1):183-185.

27- Holmquist TJ, Templeton DW, Bishnoi KD. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications. *International Journal of Impact Engineering*. 2001;25(3):211-231.

28- Cronin DS, Bui K, Kaufmann Ch, McIntosh G, Berstad T, Cronin D. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-Dyna. 4th European LS-DYNA Users Conference, 2003 May 22-23, ULM, Germany. Unknown City: European LS-DYNA; 2003.

29- Yazdani M, Rashed A. Studying the performance of multi-layered ceramic-epoxy armor under high velocity impact with finite element method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(1):11-20. [Persian]

different nose shapes. *Composite Structures*. 2000;49(3):321-329.

13- Shokrieh MM, Javadpour GH. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Composite Structures*. 2008;82(2):269-276.

14- Arias A, Rodríguez-Martínez JA, Rusinek A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008;75(6):1635-1656.

15- Babaei B, Shokrieh MM, Daneshjou K. The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid projectiles. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;530:208-217.

16- Rodríguez-Millán M, Vaz-Romero A, Rusinek A, Rodríguez-Martínez JA, Arias A. Experimental study on the perforation process of 5754-H111 and 6082-T6 aluminium plates subjected to normal impact by conical, hemispherical and blunt projectiles. *Experimental Mechanics*. 2014;54(5):729-742.

17- Yunfei D, Wei Z, Yonggang Y, Lizhong Sh, Gang W. Experimental investigation on the ballistic performance of double-layered plates subjected to impact by projectile of high strength. *International Journal of Impact Engineering*. 2014;70:38-49.

18- Mehrabani Yeganeh E, Liaghat GH, Pol MH. Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(14):309-318. [Persian]

19- Venkatesan J, Iqbal MA, Madhu V. Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon carbide/aluminium armours. *Procedia Engineering*. 2017;173:671-678.

20- Ekrami M, Ahmadi H, Bayat M, Sabouri H. Experimental study of projectiles with flat, conical and hemispherical nose shapes on low velocity impact on GLARE 3. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(7):109-118. [Persian]

21- Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of