



## Numerical and Experimental Study of Oblique Penetration of Blunt Projectile into Ceramic-Aluminum Target

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Moslemi Petrudi A.<sup>1</sup> MSc,  
Vahedi Kh.\*<sup>1</sup> PhD,  
Kamyab M.H.<sup>1</sup> MSc,  
Moslemi Petrudi M.A.<sup>2</sup> MSc

#### How to cite this article

Moslemi Petrudi A, Vahedi Kh, Kamyab M.H, Moslemi Petrudi M.A. Numerical and Experimental Study of Oblique Penetration of Blunt Projectile into Ceramic-Aluminum Target. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1253-1263.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Imam Hussein (AS), Tehran, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, University Amirkabir, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Imam Hussein (AS), Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

khvahedi@ihu.ac.ir

#### Article History

Received: May 14, 2018

Accepted: January 12, 2019

ePublished: May 01, 2019

### ABSTRACT

Penetration into ceramic-aluminum targets is of prime importance for researchers in defense and non-defense industries. In this study, the effect of a blunt projectile having a specified speed and penetrating into a ceramic-aluminum target at angles of 0, 15, 30, and 45 degrees is investigated. In this research, 8 experiments were carried out at Ballistic Laboratory of Imam Hossein University and the design of the experiments was carried out in such a way that the facilities of the laboratory could be used. The results of the study showed that by increasing the angle of obliquity, penetration depth is decreased substantially in ceramic-aluminum target, and when the angle of obliquity is increased beyond a certain limit, projectile will ricochet. Also, in this study, numerical investigation was performed, using Autodyn software. In this numerical simulation, the impact of the blunt projectile at 700 m/s on ceramic-aluminum target was carried out to determine the penetration depth into the given target. The blunt projectile penetration was simulated with oblique ceramic silicon carbide plates supplemented with aluminum 2024-T3 and the residual velocity and mass values of the projectile were determined at the exit of the combined target. The projectile was assumed to be rigid and the Johnson-Holmquist structural model was used to describe ceramic behavior and Johnson-Cook material model was used for projectile and target. The results of the experiments and numerical simulation were compared and there was a good agreement between these two modes of investigations, indicating the validity and accuracy of simulation assumptions.

**Keywords** Ceramics; Penetration; Armor Ceramic-Aluminum; Blunt Projectile; Autodyn Software

### CITATION LINKS

[1] Impact behavior of ceramic-metal armour composed ... [2] A modified analytical model for analysis of perforation ... [3] Analytical and numerical analysis of long ... [4] Analytical and numerical investigations on the penetration ... [5] Significant numerical analysis of ceramic targets ... [6] Numerical modelling of normal impact on ceramic ... [7] A theory for the deceleration of long rods after ... [8] Interaction of projectiles and composite ... [9] A simple one-dimensional approach to modelling ceramic ... [10] Impact on ceramic faced ... [11] A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic ... [12] Influence of the adhesive in the ballistic ... [13] Perforation of steel and polycarbonate plates ... [14] Environmental evaluation and assessment of ceramic ... [15] A new analytical model of normal penetration of projectiles into ... [16] Analytical and numerical investigation of penetration of conical ... [17] Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ... [18] Experimental and numerical studies on mild steel plates ... [19] Analytical and experimental study of high-velocity impact ... [20] Methodology for experimental verification of steel armour impact ... [21] Ballistic characteristics of bi-layered armour with various aluminium backing ... [22] Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon ... [23] Simulation analysis of co-continuous ceramic composite dynamic mechanical ... [24] Investigate and penetrate the ceramic gold leaf AP projectiles ... [25] Study on the performance of ceramic composite projectile ... [26] Criterion for interface defeat to penetration transition ... [27] Penetration of confined ceramics ... [28] Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to ...

## بررسی عددی و تجربی نفوذ مایل پرتابه سرتخت در اهداف سرامیک-آلومینیوم

امین مسلمی‌پطردی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>۹</sup>، تهران، ایران

خداداد واحدی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>۹</sup>، تهران، ایران

محمدحسن کامیاب MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>۹</sup>، تهران، ایران

محمدعلی مسلمی‌پطردی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

نفوذ در اهداف سرامیک-آلومینیوم از اهمیت ویژه‌ای برای محققان صنایع دفاعی و غیردفاعی برخوردار است. در این پژوهش نفوذ یک پرتابه سرتخت با سرعت مشخص در زوایای مختلف صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به صورت تجربی نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. کار تجربی صورت گرفته در این تحقیق، با انجام ۸ مرحله آزمایش در آزمایشگاه ضربه و بالستیک دانشگاه امام حسین (ع) انجام پذیرفت و طراحی آزمایشات به گونه‌ای صورت گرفت که بتوان از امکانات موجود در این آزمایشگاه استفاده نمود. نتایج نشان دادند که با افزایش زاویه تمایل عمق نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم کاهش می‌یابد و در صورت افزایش زاویه تمایل، پرتابه به مرز کمانه‌کردن خواهد رسید. همچنین، در این پژوهش به کمک نرم‌افزار Ansys autodyn، شبیه‌سازی نفوذ یک پرتابه با سرعت ۷۰۰ متر بر ثانیه در اهداف دوگانه سرامیک-آلومینیوم به منظور مشخص کردن عمق نفوذ، بررسی و اثر کمانه‌کردن پرتابه انجام شده است. پرتابه، صلب فرض شده و از مدل ساختاری جانسون هالکوتیست برای توصیف رفتار سرامیک، و مدل رفتار ماده جانسون کوک برای پرتابه و هدف استفاده شد. نفوذ پرتابه سرتخت به صفحات مایل سرامیکی سیلیکون‌کرباید و پستیپانی شده با فلز آلومینیوم T-2024<sup>۳</sup>، شبیه‌سازی و مقادیر سرعت و جرم باقی‌مانده پرتابه در خروج از هدف ترکیبی مشخص شد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه با دقت و براساس شرایط فیزیکی مساله به دست آمد. با مقایسه نتایج، همخوانی مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و یافته‌های تجربی مشاهده شد که نشان از اعتبار و دقت مفروضات شبیه‌سازی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** سرامیک، نفوذ، زره سرامیک-آلومینیوم، پرتابه سرتخت، نرم‌افزار Ansys autodyn

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

\*نویسنده مسئول: khvahedi@ihu.ac.ir

### ۱- مقدمه

موضوع نفوذ از مباحثی است که به واسطه کاربردهای بسیار گسترده آن در علوم نظامی و غیرنظامی، همواره مورد توجه کارشناسان بوده است. فرآیند نفوذ تحت تاثیر پارامترهای بسیاری مانند نوع و جنس هدف، ابعاد و جنس پرتابه، شکل دماغه پرتابه، سرعت برخورد و نیز زاویه برخورد پرتابه است [1]. اهداف دو لایه سرامیک-آلومینیوم به طور وسیع و گسترده‌ای به عنوان محافظ شخصی در جلیقه‌ها و کلاه‌خودهای ضدگلوله به کار می‌رود. سرامیک به علت داشتن دانسیته پایین و استحکام بالا به عنوان صفحه جلویی و آلومینیوم به علت انعطاف‌پذیری مناسب به عنوان ماده پشتیبان استفاده می‌شود. وظیفه سرامیک، فرسایش و کاهش سرعت پرتابه است و آلومینیوم، انرژی جنبشی قطعات خردشده را جذب می‌کند و مانع عبور آنها می‌شود [2]. از آنجایی که مدل کردن تحلیلی رفتار این گونه اهداف بسیار پیچیده بوده، اکثر کارهای انجام شده به صورت مطالعه تجربی یا عددی انجام شده است. شکست

مخروطی در اثر برگشت امواج کششی اتفاق می‌افتد. این مخروط سرامیکی، بار ناشی از برخورد پرتابه را به سطح وسیع‌تر پایه مخروط روی لایه پشتیبان منتقل می‌کند [3]. تحقیق و بررسی پدیده نفوذ در سرامیک‌ها معمولاً به سه روش تجربی و نیمه تجربی، عددی و تحلیلی یا مهندسی انجام می‌پذیرد. تاکنون مدل‌های مختلفی اعم از مدل‌های عددی، تجربی و تحلیلی در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی ارائه شده است. در روش عددی به حل کامل تمام معادلات حاکم بر نفوذ با استفاده از روش‌های مختلف مانند تفاضل محدود و اجزای محدود در محیط‌های پیوسته پرداخته می‌شود. روش‌های عددی برای تحلیل مسایل مرکب و پیچیده مناسب است [4]. اولین تحلیل عددی قابل ملاحظه بر اهداف سرامیکی توسط ویلکینز انجام شده است. این تحلیل عددی با کد تفاضل محدود برای شبیه‌سازی برخورد در ضربات قائم انجام شده است. مطالعات انجام شده توسط ویلکینز نشان داده که برای بهینه‌ساختن یک سیستم دوجزئی سرامیک لازم است که اثر متقابل پرتابه و هدف به درستی بررسی شود [5]. مدل عددی کورنر و همکاران، به تحلیل برخورد عددی یک پرتابه استوانه‌ای به یک زره سرامیک- فلزی به صورت دو بُعدی پرداخته است. رفتار ماکروسکوپی مواد در این مدل عددی، در منطقه‌ای که سرامیک در حال فرسایش بوده، به وسیله یک مدل ترکیبی با احتساب اصطکاک داخلی و انبساط حجمی ارائه شده است [6]. تیت یک مدل برای بررسی نفوذ پرتابه‌های میله‌های در اهداف سرامیکی ضخیم ارائه نمود [7]. فلورانس و ارتز مدل تحلیلی ارائه دادند که این مدل براساس تعدیل انرژی است و حد بالستیک را در اهداف سرامیکی بررسی می‌کند [8]. در مدل تحلیلی وودوارد، پدیده نفوذ در اهداف سرامیکی با روش جرم خردشده، بررسی و با ارائه روابطی، سرعت و جرم پرتابه، سرامیک و ماده هدف در هر بازه زمانی محاسبه می‌شود [9]. یک مدل تحلیلی توسط دن ریجر ارائه شد که براساس مدل وودوارد بوده و یک سری معادلات دیفرانسیلی ارائه شده است که پدیده نفوذ در اهداف سرامیکی را بررسی می‌کند [10]. چوکرون بنلولو و همکاران مدلی ارائه دادند که هدف سرامیکی با ماده کامپوزیت کولاراپوکسی به عنوان صفحه پشتی بررسی شد و سرعت و جرم باقیمانده پرتابه، تغییر مکان و کرنش ماده پشتی مورد محاسبه قرار گرفت [11]. زاتر و همکاران، یک مدل تحلیلی ارائه دادند که ضربه بالستیک پرتابه به هدف سرامیک- فلز شبیه‌سازی شد. در این مدل، رفتار پرتابه براساس مدل تیت و رفتار ماده پشتی براساس مدل وودوارد است و سرعت و جرم باقیمانده پرتابه و سرعت حد بالستیک محاسبه شد [12]. لی و گلدسمیت با استفاده از روش‌های عددی، برخورد یک پرتابه فولادی را در یک زره سرامیکی سبک وزن بررسی کرده و همچنین، به مطالعه پدیده‌هایی مانند فرسایش پرتابه، انتشار ترک، ساختار مخروطی سرامیک و شکست ورق پشت پرداخته‌اند [13]. ساستری و سیمها نیز با استفاده از یک مدل محاسباتی و مدل المان محدود به بررسی پاسخ سرامیک‌های نیمه بی‌نهایت با درصد خلوص بالا مانند آلومینای ۹۹/۵٪ در برخورد با یک پرتابه میله‌ای بلند پرداخته و نتایج خوبی در مقایسه با داده‌های تجربی به دست آورده‌اند [14]. فعلی و همکاران، یک مدل تحلیلی ارائه دادند که براساس مدل زاتر و همکاران است و با یک سری از معادلات مومنتوم، رفتار شکست مخروطی سرامیک را توصیف کردند [15]. علیزاده و واحدی پدیده نفوذ در اهداف سرامیک- فلز را به صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار دادند [16]. طهماسی‌آبادر و همکاران، پدیده نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم را به صورت تحلیلی، تجربی و عددی بررسی کردند و مدل

سرامیک پرداخته شد و نفوذ توسط یک مکانیزم گسترش حفره کروی با شروع نفوذ به یک اندازه بحرانی در یک ناحیه پلاستیکی انجام شد [27]. ساویو و مادو در سال ۲۰۱۸، به بررسی بالستیکی و ارزیابی تکه‌های سرامیکی با نسبت سرعت پرتابه ۷/۶۲ میلی‌متر پرداختند و در این بررسی، تاثیر مواد پشتی، سرعت پرتابه بر بازده بالستیک و عمق نفوذ، تاثیر بسزایی دارد و با افزایش سرعت پرتابه NDEF و NBE کاهش می‌یابد [28].

جدول ۱) آنالیز پیشینه پژوهش

چه کرده‌اند	روش تحقیق	محقق
بررسی پاسخ سرامیک‌های نیمه بی‌نهایت با درصد خلوص بالا مانند آلومینای ۹۹/۵٪ در برخورد با یک پرتابه میله‌ای بلند	مدل تحلیلی- عددی	ساستری و سیمها در سال ۲۰۰۲ [14]
به ارایه یک مدل تحلیلی براساس مدل زائر و همکاران پرداختند و با یک سری از معادلات مومنتوم، رفتار شکست مخروطی سرامیک را توصیف کردند.	مدل تحلیلی	فعلی و همکاران در سال ۲۰۱۰ [15]
به بررسی پدیده نفوذ در هدف سرامیک- آلومینیوم پرداختند و مدل وودوارد را مورد اصلاح قرار دادند.	مدل تحلیلی و عددی	طهماسی/آبدار و همکاران در سال ۲۰۱۵ [17]
به شبیه‌سازی صفحات فولادی ضخیم به ضخامت ۱۲ میلی‌متر و پرتابه ۷/۶۲ AP به صورت مایل در زوایای صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۵۷ و ۵۹ درجه و با سرعت ۸۲۰ متر بر ثانیه، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS پرداختند.	مدل عددی- تجربی	سنتیل و همکاران در سال ۲۰۱۷ [18]
برخورد سرعت بالا روی هدف‌های نانوکامپوزیتی- سرامیک را بررسی کردند.	مدل تحلیلی- تجربی	شانظری و همکاران در سال ۲۰۱۷ [19]
به بررسی تجربی و مدل‌سازی ضربه روی زره فولادی از الگوریتم‌های عددی در هدف بالستیکی پرداختند.	مدل تحلیلی- تجربی	تیریا و تربینسکی در سال ۲۰۱۷ [20]
مشخصات بالستیکی زره دو لایه با صفحه پشتیبان آلومینیومی گوناگون را با استفاده از پرتابه نوک تیز مورد بررسی قرار دادند.	-	ونکاتزان و همکاران در سال ۲۰۱۷ [21]
به بررسی عملکردهای بالستیکی از لایه آلومینا به آلومینیوم و زره‌های آلومینیومی به سلیکون‌کارباید و مدل‌های مختلف جانسون کوک برای مواد فولادی و آلومینیومی پرداختند.	مدل تحلیلی	ونکاتزان و همکاران در سال ۲۰۱۷ [22]
به تحلیل و شبیه‌سازی سرامیک- کامپوزیت و بهینه‌سازی آن پرداختند و کسر حجمی و توزیع تنش را در سه ماده آلومینیومی و سرامیک سلیکون‌کارباید مقایسه کردند.	مدل تحلیلی- عددی	وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [23]
به بررسی و نفوذ در صفحات زرهی سرامیکی پرداختند. در این آزمایش، پرتابه‌های AP با کالیبر ۷/۶۲ با هسته تنگستن، در برابر آلومینا و صفحه پشتیبان آلومینیومی بررسی شد.	-	زائر و سنجر- سیز در سال ۲۰۱۷ [24]
به بررسی نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک- کامپوزیت و شبیه‌سازی‌های عددی نفوذ پرتابه استاندارد و پرتابه کامپوزیت سرامیک به یک هدف کامپوزیت سرامیکی پرداختند.	مدل تحلیلی- عددی	یی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [25]
به بررسی معیاری برای جابه‌جایی نفوذ در ضربه پرتابه میله بلند روی زره‌های سرامیکی پرداختند و مدلی در چهار بخش توزیع فشار، تنش در هدف سرامیکی، ترک‌خوردگی و انتشار مخروط سرامیکی در سرامیک را توسعه دادند.	-	زانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ [26]
به بررسی نفوذ در اهداف سرامیکی پرداختند و با پرتابه‌های میله بلند تنگستن در تست لاندنبرگ به اصلاح مدل سرامیک پرداختند.	-	داس و همکاران (۲۰۱۸) [27]
به بررسی بالستیکی و ارزیابی تکه‌های سرامیکی با نسبت سرعت پرتابه ۷/۶۲ میلی‌متر پرداختند.	مدل تحلیلی	ساویو و مادو (۲۰۱۸) [28]

وودوارد را مورد اصلاح قرار دادند [17]. سنتیل و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی عددی و تجربی روی صفحات فولادی نرم با استفاده از پرتابه‌های AP با کالیبر ۷/۶۲ پرداختند. صفحات فولادی ضخیم به ضخامت ۱۲ میلی‌متر و پرتابه‌های AP با کالیبر ۷/۶۲ با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته و پرتابه به صورت مایل در زوایای صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۵۷، ۵۹ درجه و با سرعت ۸۲۰ متر بر ثانیه بوده و نتایج تجربی و عددی با توجه به مکانیزم شکست، سرعت باقیمانده پرتابه و زاویه بحرانی مقایسه شده است [18]. شانظری و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی تحلیلی و تجربی ضربه سرعت بالا روی هدف‌های نانوکامپوزیت- سرامیک پرداختند و مقاومت نفوذ سرامیک براساس تجزیه و تحلیل گسترش حفره، تعیین و اثرات نیم‌زاویه مخروطی اصلاح شده و سرعت باقیمانده از پرتابه با نتایج تجربی سازگار است [19]. تیریا و تربینسکی در سال ۲۰۱۷، به بررسی تجربی و مدل‌سازی ضربه روی زره فولادی پرداختند و از الگوریتم‌های عددی در بالستیک نهایی، استفاده و مشخصه‌هایی همانند سرعت و مسیر گلوله، تغییر شکل و انعطاف‌پذیری صفحه را مورد اندازه‌گیری قرار دادند و مدل‌های دقیق گلوله و هدف با نتایج تست بالستیک مقایسه شده است [20]. ونکاتزان و همکاران در سال ۲۰۱۷، مشخصات بالستیک زره دو لایه با صفحه پشتیبان آلومینیومی گوناگون را با استفاده از پرتابه نوک تیز مورد مطالعه قرار دادند که لایه سرامیکی و فلزی از دو لایه آلومینای ۹۵٪ و آلومینیوم‌های ۲۰۲۴، ۱۱۰۰، ۷۰۷۵ و ۶۰۶۱ را در سرعت‌های ۴۹۳، ۸۲۰ و ۱۲۰۰ متر بر ثانیه با استفاده از پرتابه فولادی بررسی کردند [21]. ونکاتزان و همکاران در سال ۲۰۱۷، عملکردهای بالستیکی از لایه آلومینا به آلومینیوم و زره‌های آلومینیومی به سلیکون‌کارباید و مدل‌های مختلف جانسون کوک را برای مواد فولادی و آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که کارایی سرامیک- آلومینیوم بالاتر از آلومینا- آلومینیوم بوده است. همچنین، تخریب بیشتری را ایجاد می‌کند و مد شکست در پرتابه نوک‌تیز و سرخست را ارزیابی کردند [22]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، به تحلیل و شبیه‌سازی سرامیک- کامپوزیت و بهینه‌سازی پرداختند و کسر حجمی و توزیع تنش را در سه ماده آلومینیومی و سرامیک سلیکون‌کارباید مقایسه کردند که افزایش تنش قابل توجهی در سرامیک پدیدار شد و سرامیک کسر حجمی پایین‌تری را در تست‌ها نشان داد [23]. زائر و سنجر- سیز در سال ۲۰۱۷، به بررسی و نفوذ در صفحات زرهی سرامیکی پرداختند. در این آزمایش، پرتابه‌های AP با کالیبر ۷/۶۲ با هسته تنگستن، در برابر آلومینا و صفحه پشتیبان آلومینیومی، بررسی و قطعات سرامیکی با چسب پلی‌اورتان در نظر گرفته شد [24]. یی و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی عملکردی سرامیک- کامپوزیت و نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک- کامپوزیت پرداختند. شبیه‌سازی‌های عددی نفوذ پرتابه استاندارد و پرتابه کامپوزیت سرامیک به یک هدف کامپوزیت سرامیکی انجام شد. نتایج نشان داد که پرتابه کامپوزیت سرامیک بهتر از پرتابه استاندارد است و زاویه باز خود را از بین می‌برد و در نتیجه، توانایی پرتابه زرهی را حفظ می‌کند [25]. زانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، معیاری را برای جابه‌جایی نفوذ در ضربه پرتابه میله بلند روی زره‌های سرامیکی مورد بررسی قرار دادند و این مدل در چهار بخش محاسبه شده است که توزیع فشار، تنش در هدف سرامیکی، ترک‌خوردگی و انتشار مخروط سرامیکی در سرامیک را توسعه دادند [26]. داس و همکاران در سال ۲۰۱۸، نفوذ در اهداف سرامیکی را مورد بررسی قرار دادند و با پرتابه‌های میله بلند تنگستن در تست لاندنبرگ به اصلاح مدل

پرتابه به هدف دارای زوایای زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه است. به این ترتیب هدف سرامیکی (SiC) و آلومینیومی (۲۰۲۴-T۳) با ضخامت ۱۰×۵×۵۰ میلی‌متر و پرتابه فولادی (Steel ۴۳۴۰) با سرعت ۷۰۰ متر بر ثانیه، طول ساق ۲۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر و با شکل پرتابه سرتخت ترسیم شده است.

#### ۱-۴ مدل فلورانس

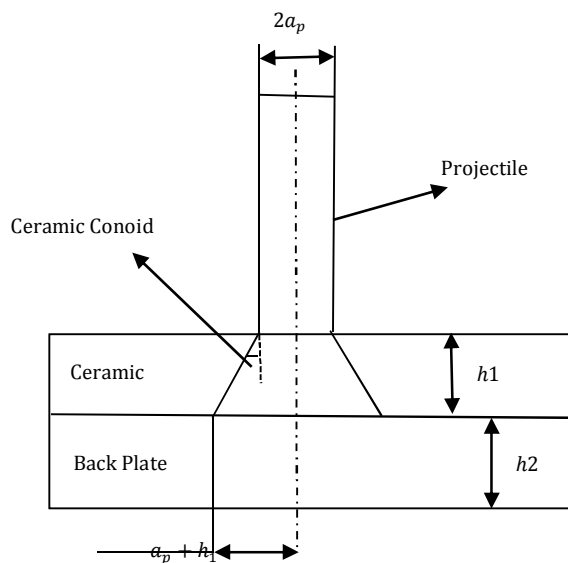
یکی از معروف‌ترین مدل‌های تحلیلی بوده که در آن نفوذ در اهداف مرکب (سرامیک- فلز) مورد بررسی قرار گرفته است. اساس مدل وی این بود که سرامیک، نیرو را روی یک ناحیه وسیع پخش می‌کند و مواد پشتی، تمام انرژی حاصل از برخورد را جذب خواهد کرد. در این مدل، سرعت حد بالستیک توسط رابطه ۵ پیش‌بینی شده است. شکل ۱ بیانگر برخورد پرتابه به هدف سرامیک- فلز و ارتباط مابین متغیرها است.

$$f(\theta) = \frac{M_p}{[M_p + (\rho_1 + h_1 + \rho_2 h_2)\pi a^2] a} \quad (1)$$

$$= a_p + 2h_2$$

که در روابط بالا متغیرها به‌صورت زیر هستند:

- $V_p$ : سرعت بالستیک پیش‌بینی
- $\varepsilon_2$ : کرنش شکست ماده پشتیبان
- $\sigma_2$ : مقاومت نهایی کششی لایه پشتیبان (UTS)
- $\rho_2$ : چگالی لایه پشتیبان
- $h_2$ : ضخامت لایه پشتیبان
- $\rho_1$ : چگالی صفحه جلویی
- $M_p$ : جرم پرتابه



شکل ۱) برخورد پرتابه با هدف و تشکیل مخروط سرامیکی

#### ۵- فرآیند حل

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، پس از ترسیم هندسی باید خصوصیات مواد مورد استفاده در آزمایشات را برای نرم‌افزار تعریف کرد. در حقیقت، برای رسیدن به نتایج قابل قبول، باید تعریف مناسب و دقیقی از مدل ماده پرتابه و هدف باشد که برای این منظور و مشخص شدن معیارهای خرابی و جدایش از نتایج موجود استفاده شده که در جدول‌های ۵-۳ به‌اختصار آورده شده است.

تحلیل پیشینه تحقیق در جدول ۱ نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات انجام‌شده در زمینه برخورد و نفوذ نرمال پرتابه در اهداف سرامیکی و چندلایه بوده و برخورد و نفوذ در اهداف چندلایه به‌صورت مایل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در تحقیق حاضر در نظر است که به بررسی نفوذ مایل پرتابه سرتخت در اهداف دوگانه SiC و آلومینیوم برای تعیین عمق نفوذ پرتابه به‌صورت تجربی و عددی پرداخته شود که با تحقیقات گذشته فرق دارد و تاکنون انجام نشده است. در تحقیق حاضر به‌کمک نرم‌افزار المان محدود Ansys autodyn، با استفاده از مدل ساختاری جانسون هالمکوئیست برای شبیه‌سازی رفتار سرامیک و مدل رفتار ماده جانسون کوک برای شبیه‌سازی پرتابه و هدف نفوذ یک پرتابه سرتخت به صفحات مایل سرامیکی سیلیکون‌کارباید و پشتیبانی‌شده با فلز آلومینیوم ۲۰۲۴-T۳، شبیه‌سازی انجام و مقادیر سرعت و جرم باقیمانده پرتابه در خروج از هدف ترکیبی مشخص شد. مقادیر حاصل با نتایج تجربی، مقایسه و مشاهده شد که انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد.

#### ۲- روش حل

در اکثر نرم‌افزارهای المان محدود، روش شبیه‌سازی مسایل مشابه است. معمولاً مراحل شبیه‌سازی به سه گروه پیش‌پردازش، حلگر و پس‌پردازش تقسیم می‌شود.

در نرم‌افزار Ansys autodyn، پیش‌پردازشگر قدرتمندی با محیط ساده و روان به‌نام FEMB وجود دارد. مراحل کار در FEMB به‌صورت زیر است:

۱- مدل کردن هندسی

۲- المان‌بندی

۳- انتخاب مدل ماده

۴- ایجاد سطح تماس

۵- اعمال شرایط مرزی و اولیه

بعد از اتمام مراحل بالا در پیش‌پردازشگر، تحلیلگر نرم‌افزار در صورتی که اعلام خطا نکنند، مساله را حل می‌نماید و سپس می‌توان نتیجه را به‌صورت کانتور، تغییر شکل و همچنین گراف‌های مختلف در محیط پس‌پردازشگر مشاهده نمود.

#### ۳- شبیه‌سازی پدیده نفوذ در نرم‌افزار AUTODYN

در این بخش، پدیده نفوذ نرمال پرتابه با شکل دماغه سرتخت در زوایای مختلف اهداف سرامیک- آلومینیوم شبیه‌سازی می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها برای مشخص کردن عمق نفوذ، بررسی و تحلیل مخروط ناقص سرامیکی و مشخص کردن اثر کمانه‌کردن پرتابه انجام خواهند شد. در جدول ۲، خواص سرامیک‌ها با فلزات و پلیمر مقایسه شده است.

جدول ۲) مقایسه موادها

خواص	سرامیک	فلز	پلیمر
سختی	خیلی بالا	کم	خیلی کم
چگالی	پایین	بالا	خیلی کم
ضریب الاستیک	خیلی بالا	بالا	کم
مقاومت سایشی	بالا	کم	کم
مقاومت خوردگی	بالا	کم	کم
شکل‌پذیری	پایین	بالا	بالا

#### ۴- شرح مساله

در ابتدا پرتابه و هدف در دو بخش مجزا مدل می‌شوند و برخورد

می‌دهد. بنابراین به منظور بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد بالستیکی اهداف مرکب از سرامیک و آلومینیوم، یک مدل المان محدود ایجاد شد. بدین منظور، برای طراحی هدف و پرتابه از نرم‌افزار Solid work استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، صفحه آلومینیومی و سرامیکی با ابعاد  $50 \times 50 \times 5$  میلی‌متر مدل‌سازی می‌شود. پرتابه که به شکل استوانه سرخت طراحی شده، از جنس فولاد بوده و قطر آن ۱۰ میلی‌متر است.

در مش‌بندی انجام‌شده، صفحه پشتی آلومینیومی دارای ۱۹۵۰۰۰ المان و ۲۰۹۳۱۱ گره، صفحه جلویی (سرامیک سیلیکون‌کارباید) دارای ۲۰۰۰۰۰ المان و ۲۱۴۲۲۱ گره و گلوله استوانه‌ای فولادی دارای ۸۰۰۰ المان و ۹۲۶۱ گره است. مش‌بندی انجام‌شده دارای دقت بالایی در نتایج حد بالستیک بوده که در بخش نتایج و بحث پس از برخورد پرتابه نشان داده شده است.

در این بررسی، دو نوع تماس وجود دارد. یک تماس بین پرتابه و هدف مرکب از سرامیک و آلومینیوم و دیگری تماس بین صفحه سرامیکی با صفحه آلومینیومی است. عمومی‌ترین نوع تماس، تعریف تماس اتوماتیک است. در کنار این نوع تماس، تماس فرسایشی نیز وجود دارد. مشکلی که تماس اتوماتیک برای المان‌های جامد دارد این است که پرتابه از هدف عبور می‌کند، ولی المان‌هایی که به تنش و کرنش نهایی می‌رسند، از تحلیل حذف نمی‌شوند. اما این مشکل با استفاده از تماس فرسایشی حل می‌شود. در ضربه پرتابه روی هدف، تماس بین پرتابه و مجموعه سرامیک و آلومینیوم به صورت تماس سه‌بعدی از نوع تماس فرسایشی تعریف شده که دلیل انتخاب این نوع تماس، نفوذ پرتابه، درون هدف و حذف المان‌ها است. انرژی جنبشی پرتابه با حذف المان‌های آن کاهش می‌یابد.

## ۷- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی سرامیک- آلومینیوم در زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۷-۱- برخورد نرمال پرتابه به اهداف سرامیک- آلومینیوم در حالت صفر درجه با سرعت ۷۸۰ متر بر ثانیه

در شکل ۲، برخورد نرمال پرتابه سرخت به اهداف سرامیک- آلومینیوم در حالت صفر درجه با سرعت ۷۸۰ متر بر ثانیه به هدف رویی سرامیک سیلیکون‌کارباید و لایه پشتیبان آلومینیوم ۲۰۲۴، در شکل ۳، برخورد پرتابه با هدف و تشکیل مخروط سرامیکی و در شکل ۴ تخریب ایجادشده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دولایه در زاویه صفر درجه نشان داده شده است.

در نمودار ۱، تغییرات سرعت پرتابه از ۷۸۰ متر بر ثانیه در شروع حرکت پس از برخورد به هدف سرامیکی، به ۴۲۰ متر بر ثانیه در زمان بین صفر تا ۰/۱ میلی‌ثانیه و در زمان ۰/۰۵ میلی‌ثانیه به حداقل سرعت خود و نهایتاً صفر می‌رسد.

### ۷-۲- برخورد مایل پرتابه به اهداف سرامیک- آلومینیوم در حالت زاویه ۱۵ درجه

در اینجا پرتابه فولادی با سرعت ۷۸۰ متر بر ثانیه به اهداف دو لایه در زاویه ۱۵ درجه برخورد می‌کند. شکل ۵، عمق نفوذ در اهداف سرامیک- آلومینیوم و شکل ۶، تخریب ایجادشده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دولایه در زاویه ۱۵ درجه را نشان می‌دهد.

در نمودار ۲، تغییرات سرعت پرتابه از ۷۸۰ متر بر ثانیه در شروع حرکت پس از برخورد به هدف سرامیکی، به ۴۵۰ متر بر ثانیه در زمان بین ۰/۱ تا ۰/۰۲ میلی‌ثانیه و در زمان ۰/۰۴ میلی‌ثانیه به حداقل سرعت خود و نهایتاً صفر می‌رسد.

جدول ۳) پارامترهای مدل ماده جانسون کوک (JH-1) برای هدف سرامیکی

مقدار	ثابت‌ها
۳/۲۱۵	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
چند جمله‌ای	معادله حالت
۲/۲e+۸	ضریب حجمی (KPa)
۳/۶۱e+۸	ثابت فشار (KPa)
۱/۹۳e+۸	مدل استحکام (KPa)
۷/۱e+۶	حد الاستیک (KPa)
۲/۵e+۶	ثابت استحکام سالم (KPa)
۰/۰۰۹	ثابت نرخ کرنش (KPa)
۱/۳e+۶	حداکثر استحکام شکست (KPa)
۰/۴	ثابت استحکام تخریبی (KPa)
-۷/۵e+۵	حد کششی (KPa)
۱/۲	ثابت تخریب (KPa)
۹/۹۷۵e+۷	ثابت تخریب (KPa)
۱/۰	ثابت حجمی (KPa)
۱/۵	کرنش خوردگی (KPa)

جدول ۴) پارامترهای مدل ماده جانسون کوک (JH-1) برای هدف آلومینیومی

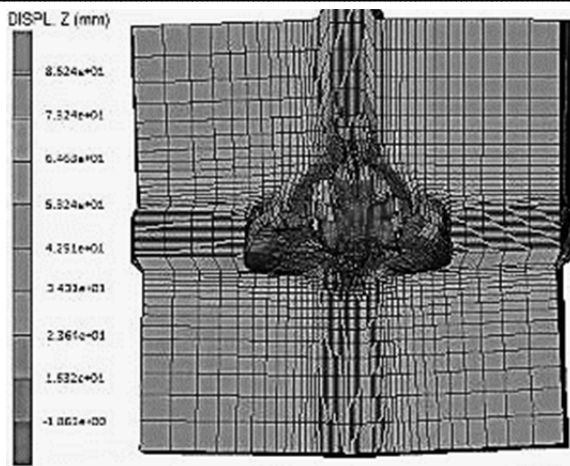
مقدار	ثابت‌ها
۲/۷۸۵	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
ضربه	معادله حالت
۵۳۲۸	پارامتر C1 (J/kg.k)
۱/۳۳۸	پارامتر S1 (m/s)
۸۷۴/۹	گرمای ویژه (J/kg.k)
۲/۶۹۲e+۷	ضریب برشی (m)
۱/۶۷e+۵	استحکام نهایی استاتیکی (KPa)
۵/۹۶e+۵	ثابت سختی کرنش (KPa)
۰/۵۵۱	توان سختی کرنش (n)
۰/۸۵۹	توان نرم شدن حرارتی (n)
۸۳۹	درجه حرارت ذوب (m)
۱/۰	نرخ کرنش مرجع (KPa)
۰/۱۱۲	ثابت تخریب (d)
۰/۱۲۳	ثابت تخریب (d)
۰/۰۰۷	ثابت تخریب (d)
۰	ثابت تخریب (d)
۱/۵	کرنش خوردگی (KPa)

جدول ۵) پارامترهای مدل ماده جانسون کوک (JH-1) برای پرتابه فولادی

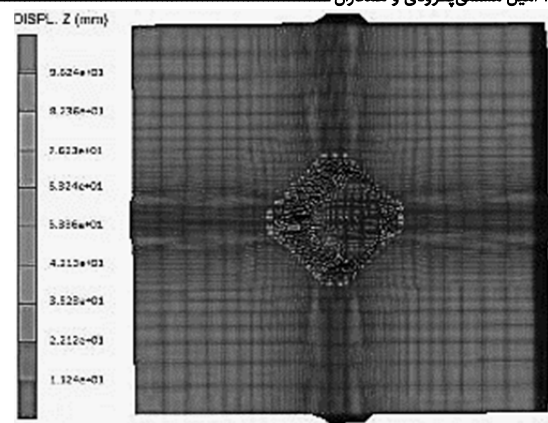
مقدار	ثابت‌ها
۷/۸۳	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
خطی	معادله حالت
۴۷۷	گرمای ویژه (J/kg.k)
۷/۷e+۷	ضریب برشی (m)
۹/۵e+۵	استحکام نهایی استاتیکی (KPa)
۷/۲۵e+۵	ثابت سختی کرنش (KPa)
۰/۳۷۵	توان سختی کرنش (n)
۰/۶۲۵	توان نرم شدن حرارتی (n)
۱/۷۹۳e+۳	درجه حرارت ذوب (m)
۱/۰	نرخ کرنش مرجع (KPa)
-۰/۸	ثابت تخریب (d)
۲/۱	ثابت تخریب (d)
-۰/۵	ثابت تخریب (d)
۰/۰۰۲	ثابت تخریب (d)
۰/۶۱	ثابت تخریب (d)
۱/۵	کرنش خوردگی (KPa)

## ۶- شبیه‌سازی عددی

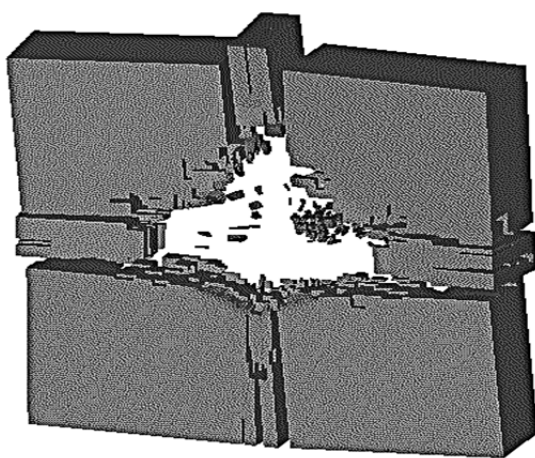
با پیشرفت نرم‌افزارهای تحلیل عددی، استفاده از آنها باعث کاهش هزینه و زمان می‌شود و نتایج قابل قبول و مطمئنی به دست



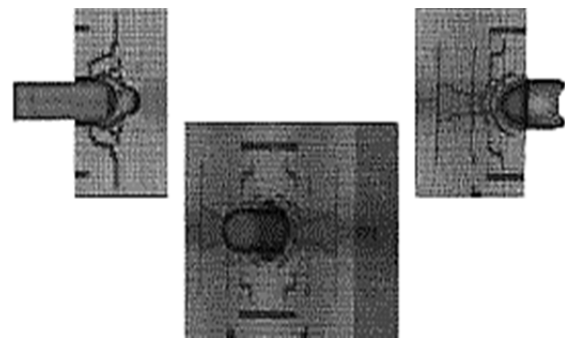
شکل ۵) عمق نفوذ در اهداف سرامیک- آلومینیوم



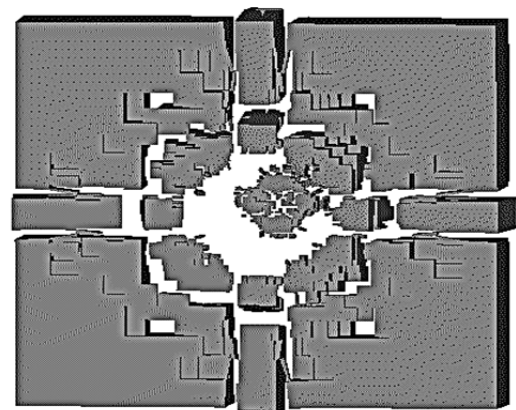
شکل ۶) عمق نفوذ در اهداف سرامیک- آلومینیوم



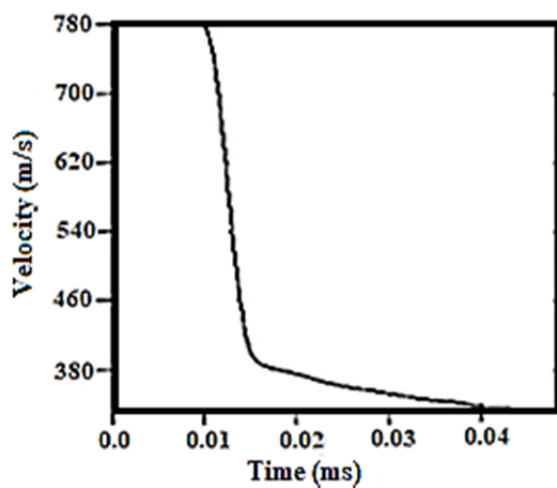
شکل ۷) تخریب ایجادشده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دو لایه در زاویه ۱۵درجه



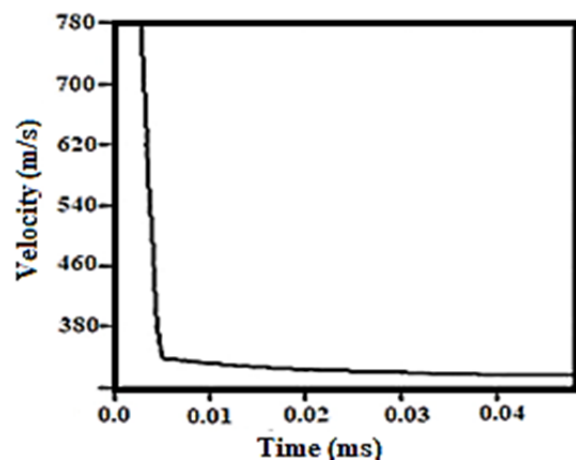
شکل ۸) برخورد پرتابه با هدف و تشکیل مخروط سرامیکی



شکل ۹) تخریب ایجادشده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دو لایه در زاویه صفر درجه



نمودار ۲) تغییرات سرعت نسبت به زمان



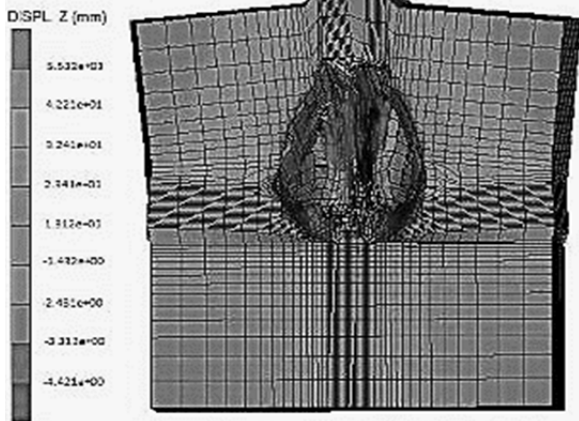
نمودار ۱) تغییرات سرعت نسبت به زمان

### ۷-۳- برخورد مایل پرتابه به اهداف سرامیک- آلومینیوم در حالت زاویه ۳۰درجه

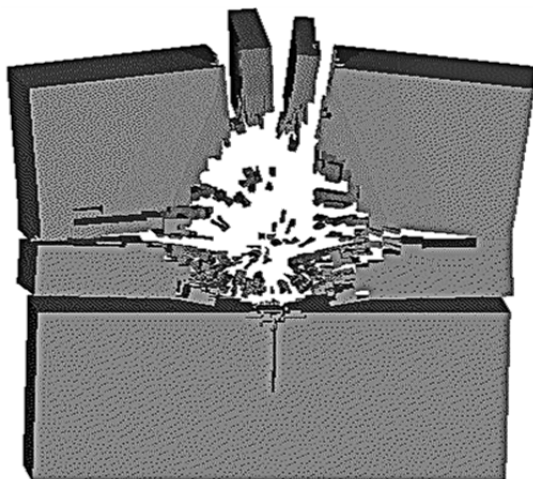
در اینجا پرتابه فولادی با سرعت ۷۸۰ متر بر ثانیه به اهداف دو لایه در زاویه ۳۰درجه برخورد می‌کند. در شکل ۷، عمق نفوذ در اهداف سرامیک- آلومینیوم و در شکل ۸، تخریب ایجادشده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دو لایه در زاویه ۳۰درجه مشاهده می‌شود.

سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۴۵ درجه برخورد می‌کند. در شکل ۹، عمق نفوذ در اهداف سرامیک-آلومینیوم و در شکل ۱۰، تخریب ایجاد شده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دو لایه در زاویه ۴۵ درجه مشاهده می‌شود.

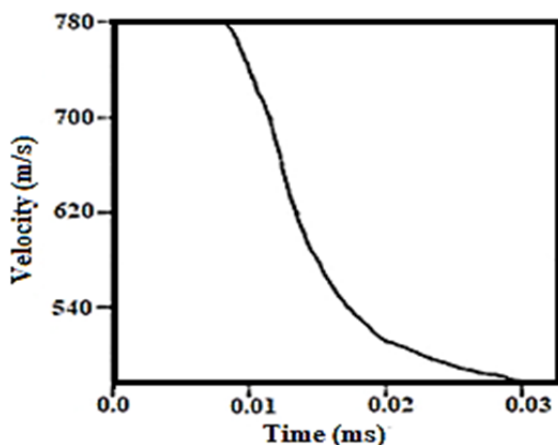
در نمودار ۴، تغییرات سرعت پرتابه از ۷۸۰ متر بر ثانیه در شروع حرکت پس از برخورد به هدف سرامیکی، به ۳۱۰ متر بر ثانیه در زمان ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌ثانیه و در زمان ۰/۵ میلی‌ثانیه به حداقل سرعت خود و نهایتاً صفر می‌رسد.



شکل ۹) عمق نفوذ در اهداف سرامیک-آلومینیوم

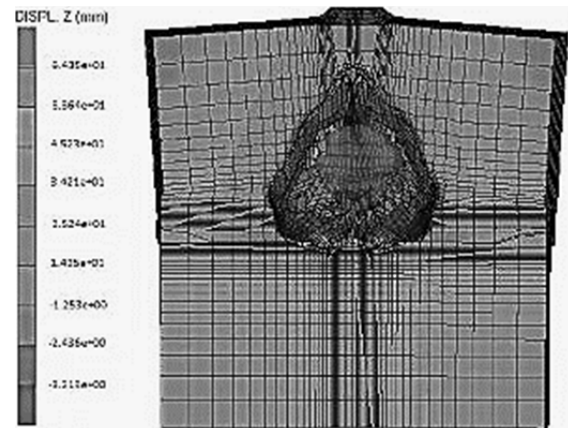


شکل ۱۰) تخریب ایجاد شده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دو لایه در زاویه ۴۵ درجه

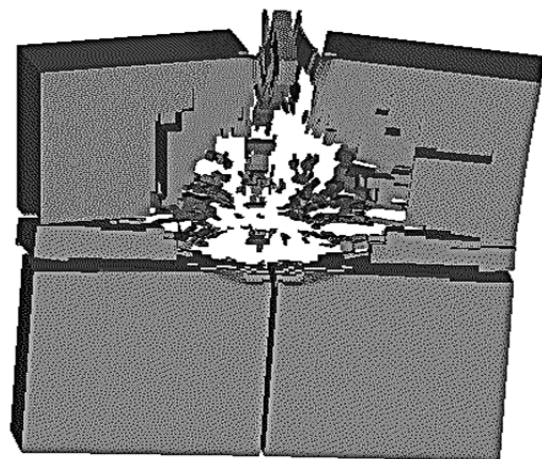


نمودار ۴) تغییرات سرعت نسبت به زمان

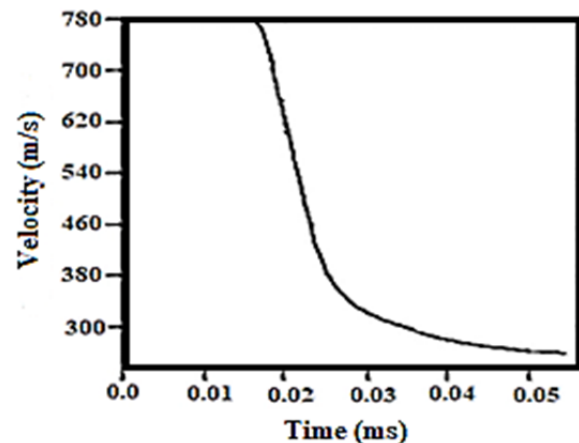
در نمودار ۳، تغییرات سرعت پرتابه از ۷۸۰ متر بر ثانیه در شروع حرکت پس از برخورد به هدف سرامیکی، به ۴۱۰ متر بر ثانیه در زمان ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌ثانیه و در زمان ۰/۵ میلی‌ثانیه به حداقل سرعت خود و نهایتاً صفر می‌رسد.



شکل ۷) عمق نفوذ در اهداف سرامیک-آلومینیوم



شکل ۸) تخریب ایجاد شده پس از برخورد پرتابه فولادی به هدف دو لایه در زاویه ۳۰ درجه



نمودار ۳) تغییرات سرعت نسبت به زمان

۴-۷- برخورد مایل پرتابه به اهداف سرامیک-آلومینیوم در حالت زاویه ۴۵ درجه در اینجا پرتابه فولادی با سرعت ۷۸۰ متر بر ثانیه به اهداف

### ۸- مراحل ساخت هدف سرامیک- آلومینیوم و پرتابه

مرحله ساخت یک هدف سرامیک- آلومینیوم به صورت زیر است:

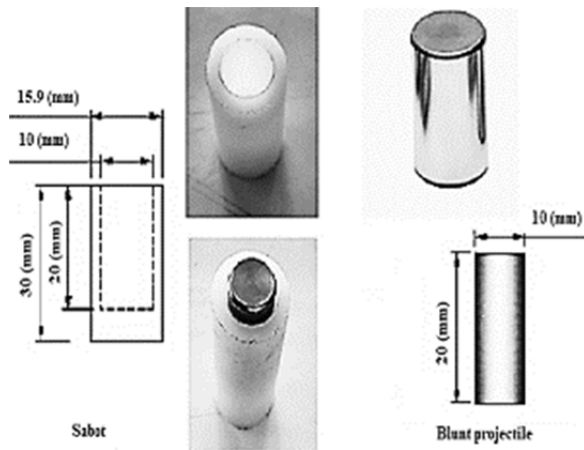
۱- اتصال اولیه سرامیک به آلومینیوم

۲- قالب گیری مناسب توسط رزین یا چسب پاتکس

۳- ماشین کاری هدف برای همگن ساختن ابعادی آن

در ادامه برای اتصال سرامیک به آلومینیوم، پس از آماده نمودن چسب پاتکس، مقداری از آن روی آلومینیوم ریخته و سپس سرامیک توسط گیره به آلومینیوم محکم می شود. برای رسیدن به استحکام مطلوب، یک روز زمان نیاز است. پس از گذشت یک روز، مرحله بعد قالب گیری بوده که دور تا دور آلومینیوم توسط چوب انجام داده شده است. در این مرحله، توسط چسب فوری یک چهارچوب، ایجاد و هر گونه درز احتمالی با چسب فوری گرفته می شود. هدف از این کار، ایجاد فضای بسته و یکنواخت برای ریختن چسب پاتکس در اطراف هدف و در ادامه کار برای جلوگیری از پرتاب شدن تکه سرامیکی به اطراف است. از دلایل استفاده از چوب می توان به ارزان بودن و قابلیت ماشین کاری راحت و همچنین براده برداری با دست نام برد و در شکل ۱۱، نمونه سرامیک- آلومینیوم و در شکل ۱۲، نمونه سرامیک- آلومینیوم قالب گیری شده توسط چوب و چسب مشاهده می شود.

پرتابه های ضد زره معمولاً از فولادهای با سختی بسیار بالا ساخته می شوند. پرتابه های سرتخت فولادی ۴۳۴۰ برای شلیک به سمت هدف سرامیک- آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفته اند. در ادامه، مراحل ساخت سابوت گلوله با استفاده از مته زنی و تراشکاری صورت گرفته و هندسه پرتابه و سابوت مورد استفاده در آزمایش در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ هندسه پرتابه و سابوت مورد استفاده در آزمایش

### ۹- نتایج آزمایشات

در این قسمت به بررسی نتایج آزمایش های صورت گرفته در برخورد نمونه سرامیک- آلومینیوم پرداخته شده و مشخصات وزنی پرتابه و هدف در هر آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است. در مرحله اول آزمایش، تعیین محدوده سرعت با تفنگ گاز سبک صورت گرفت که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این آزمایش فشار ۱۲۰ بار و با استفاده از کپسول گاز هوای فشرده تامین می شد و سرعت آن حدود ۲۷۳ متر بر ثانیه بود که سرعت پایینی قلمداد می شود و بنابراین روند آزمایش به علت فشار و سرعت کم مورد قبول واقع نشد.

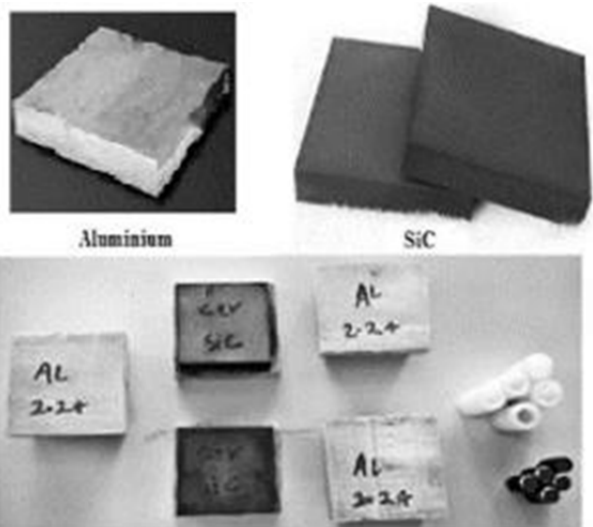
جدول ۶ مشخصات وزنی پرتابه و هدف در هر آزمایش

شماره آزمایش	وزن سرامیک (گرم)	وزن فلز (گرم)	وزن گلوله (گرم)	وزن سابوت (گرم)	منفجره C4 (گرم)	سرعت برخورد (متر بر ثانیه)
۱	-	-	۱۲/۱۵	۴/۱	-	۲۷۳
۲	-	-	۱۲/۱۳	۲/۴	۶	۱۰۰۰
۳	-	-	۱۲/۱۳	۱/۴	۴	۵۷۴
۴	-	-	۱۲/۱۵	۳/۴	۴	۵۰۲
۵	۲۰۰	۲۳۰	۱۲/۱۴	۲/۴	۴	۷۷۵
۶	۲۰۰	۲۳۰	۱۲/۱۴	۱/۴	۴	۷۸۱
۷	۲۰۰	۲۳۰	۱۲/۱۵	۳/۴	۴	۷۸۷
۸	۲۰۰	۲۳۰	۱۲/۱۳	۲/۴	۴	۷۹۳



شکل ۱۴ مجموعه دستگاه تفنگ گازی آزمایش با لاستیک

در مرحله دوم آزمایش، تعیین محدوده سرعت با استفاده از ۶ گرم ماده منفجره C4 انجام شد که سرعت سنج، زمان مربوط به آزمایش ۱۱۴ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۱۱۴ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۲ متر میزکار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۱/۵ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۱۰۰۸ متر بر ثانیه محاسبه



شکل ۱۱ نمونه سرامیک- آلومینیوم



شکل ۱۲ نمونه سرامیک- آلومینیوم قالب گیری شده توسط چوب و چسب



آزمایش در سرعت ۱۲۸ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۰۱۲۸ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۵۰ سانتی متری میزکار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۰ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۷۸۱ متر بر ثانیه محاسبه شده که در آزمایش پنجم، برخورد با موفقیت با زاویه ۱۵ درجه انجام شده است. شکل ۱۷، برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۱۵ درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷) برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۱۵ درجه

آزمایش هفتم، با بستن نمونه سرامیک-آلومینیوم به فیکسچر و در زاویه ۳۰ درجه انجام شده است. در ادامه، از ۴ گرم ماده منفجره C4 استفاده شده که سرعت سنج، زمان مربوط به آزمایش ۱۲۷ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۰۱۲۷ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۵۰ سانتی متری میزکار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۰ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۷۸۷ متر بر ثانیه محاسبه شده که در آزمایش هفتم، برخورد با موفقیت به زاویه ۳۰ درجه انجام شده است. شکل ۱۸، برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.

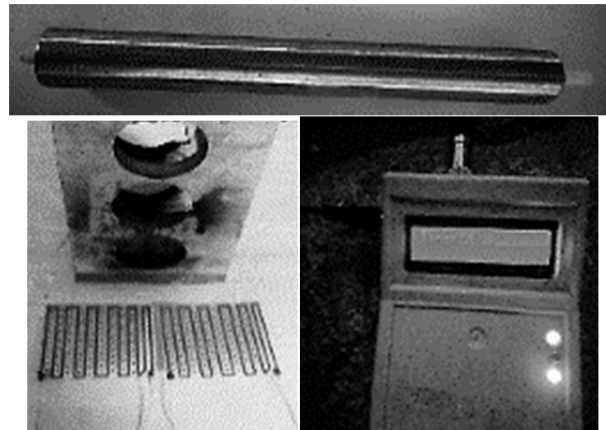


شکل ۱۸) برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۳۰ درجه

آزمایش هشتم، با بستن نمونه سرامیک-آلومینیوم به فیکسچر و در زاویه ۴۵ درجه انجام گرفته است. در ادامه، از ۴ گرم ماده منفجره C4 استفاده شده که سرعت سنج، زمان مربوط به آزمایش ۱۲۶ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۰۱۲۶ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۵۰ سانتی متری میز کار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۰ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۷۹۳ متر بر ثانیه محاسبه شده که در آزمایش هشتم، برخورد با موفقیت در زاویه ۴۵ درجه انجام شده است. شکل ۱۹، برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. در شکل ۲۰، پرتابه و لوله‌های انفجار اندازه‌گیری عمق سرامیک-آلومینیوم مشاهده می‌شود.

جدول ۷، مقایسه عمق نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم در هر آزمایش را نشان می‌دهد و همان گونه که از نمودار ۵ مشخص بوده، با افزایش زاویه، تمایل مقدار نفوذ در هدف کاهش یافته است. بدیهی است در صورت افزایش زاویه، تمایل پرتابه به مرز کمانه‌کردن خواهد رسید. به علت محدودیت‌های تستی، آزمون در زوایای بالاتر از ۴۵ درجه انجام نشد، اگرچه روند تست‌ها بیانگر این واقعیت است که با افزایش زاویه، تمایل عمق نفوذ در هدف کاهش می‌یابد.

شده است. به علت گرم وزنی بالای مواد منفجره، لوله پرتابه متلاشی شد. شکل ۱۵، لوله انفجاری پرتابه، سرعت سنج و برد الکترونیکی را نشان می‌دهد.

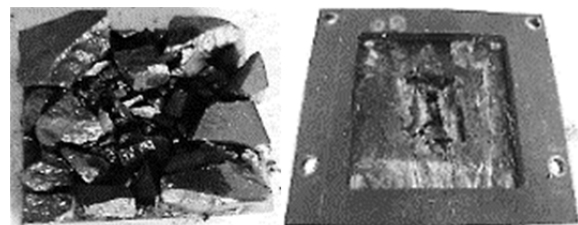


شکل ۱۵) لوله انفجاری پرتابه، سرعت سنج و برد الکترونیکی

در مرحله سوم آزمایش، تعیین محدوده سرعت با استفاده از ۴ گرم ماده منفجره C4 انجام شده که سرعت سنج، زمان مربوط به آزمایش ۱۷۴ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۰۱۷۴ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۲ متر میزکار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۰ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۵۷۴ متر بر ثانیه محاسبه شده است و بدین صورت آزمایش سوم با موفقیت به پایان رسید.

مرحله چهارم آزمایش، با بستن نمونه سرامیک-آلومینیوم به فیکسچر و استفاده از ۴ گرم ماده منفجره C4 انجام شده که سرعت سنج، زمان مربوط به آزمایش ۱۹۹ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۰۱۹۹ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۲ متر میزکار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۰ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۵۰۲ متر بر ثانیه محاسبه شده که در آزمایش چهارم تا حدودی انحراف گلوله رخ داده است.

مرحله پنجم آزمایش، با بستن نمونه سرامیک-آلومینیوم به فیکسچر و در زاویه صفر درجه صورت گرفته است. در ادامه، از ۴ گرم ماده منفجره C4 استفاده شده است که سرعت سنج، زمان مربوط به آزمایش ۱۲۹ میکروثانیه برابر با ۰/۰۰۰۱۲۹ ثانیه را نشان داده و پرتابه در فاصله ۵۰ سانتی متری میزکار و فاصله بین دو برد الکترونیکی ۱۰ سانتی متر قرار داده شده که سرعت حاصل از انفجار C4، ۷۷۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است که در آزمایش پنجم، برخورد زاویه صفر درجه با موفقیت انجام شد. شکل ۱۶، برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه صفر درجه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶) برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه صفر درجه

آزمایش ششم، با بستن نمونه سرامیک-آلومینیوم به فیکسچر و در زاویه ۱۵ درجه قرار انجام شده است. در ادامه، از ۴ گرم ماده منفجره C4 استفاده شده است که سرعت سنج، زمان مربوط به

از لایه سرامیکی ۱۰ میلی‌متر عبور کرده است، اما در لایه پشتیبان (آلومینیومی) اثری از عمق نفوذ دیده نمی‌شود. با توجه به اینکه با افزایش سرعت اولیه پرتابه، با سرعت‌های بالاتر، عملکرد پرتابه سرتخت بهتر می‌شود، اما به علت محدودیت‌های آزمایشگاهی و مالی، تست تجربی انجام نگرفت.

بررسی نتایج نشان داد که هرچه زاویه تمایل پرتابه از ۴۵ درجه بالاتر می‌رود، امکان کمانه کردن پرتابه افزایش می‌یابد. نتایج برخورد پرتابه سرتخت با هدف سرامیک-آلومینیوم با سرعت برخورد ۷۰۰ متر بر ثانیه نشان داد که بیشترین و کمترین عمق نفوذ در تغییرات زاویه برخورد از صفر تا ۴۵ درجه به ترتیب برابر با ۸/۵ میلی‌متر در زاویه صفر و ۴/۹ میلی‌متر در زاویه ۴۵ درجه است. نتایج برخورد پرتابه سرتخت با هدف سرامیک-آلومینیوم در جدول ۷ آمده است. در این جدول با سرعت برخورد ۷۰۰ متر بر ثانیه، عمق نفوذ در برخورد اندازه‌گیری شده است.

نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش زاویه از صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، مقدار عمق نفوذ در لایه سرامیکی به ترتیب ۸/۵، ۷/۷، ۵/۸ و ۴/۹ میلی‌متر بوده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه، تمایل عمق نفوذ در لایه سرامیکی، کاهش قابل توجهی داشته است.

**تشکر و قدردانی:** بخشی از محاسبات این پژوهش در آزمایشگاه تسلیحات و ضربه دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup> انجام شد که بدین وسیله تشکر می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

**سهم نویسندگان:** امین مسلمی پطرودی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ خداداد واحدی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ محمدحسن کامیاب (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ محمدعلی مسلمی پطرودی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/اروش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۱۰٪)

**منابع مالی:** این پژوهش توسط دانشگاه جامع امام حسین(ع) حمایت مالی شده است.

### منابع

- 1- Azarafza R, Arab A, Mehdipoor A. Impact behavior of ceramic-metal armour composed of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-nano SiC composite. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2012;5(5):83-87.
- 2- Liaghat GH, Shanazari H, Tahmasebi M, Aboutorabi A, Hadavinia H. A modified analytical model for analysis of perforation of projectile into ceramic composite targets. *International Journal of Composite Materials*. 2013;3(6B):17-22.
- 3- Shafiei M, Vahedi K. Analytical and numerical analysis of long rod projectile penetrating into concrete and concrete/steel targets. *Iranian Scientific Association of Energetic Materials*. 2013;8(1):43-52. [Persian]
- 4- Alavi Nia A, Kazemi M. Analytical and numerical investigations on the penetration of rigid projectiles into



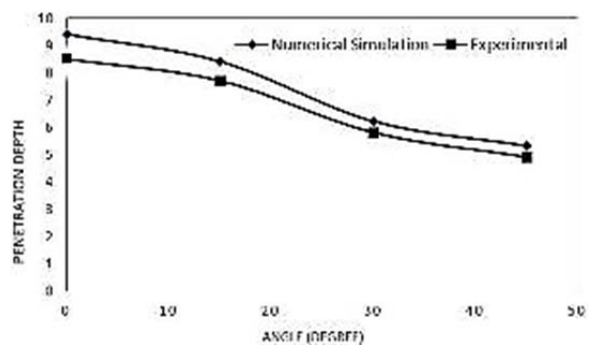
شکل ۱۹) برخورد به هدف سرامیک-آلومینیوم در زاویه ۴۵ درجه



شکل ۲۰) پرتابه، لوله‌های انفجار و اندازه‌گیری عمق سرامیک-آلومینیوم

جدول ۷) مقایسه عمق نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم در هر آزمایش

زاویه برخورد (میلی‌متر)	صفر درجه	۱۵ درجه	۳۰ درجه	۴۵ درجه
سرعت برخورد (متر بر ثانیه)	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
ضخامت لایه سرامیک-آلومینیوم (میلی‌متر)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
شبیه‌سازی عددی (میلی‌متر)	۹/۶	۸/۶	۶/۴	۵/۵
تجربی (میلی‌متر)	۸/۵	۷/۷	۵/۸	۴/۹
درصد خطا (%)	۱۱/۴%	۱۰/۴%	۹/۳%	۱۰/۹%



نمودار ۵) مقایسه عمق نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم در شبیه‌سازی عددی و تست تجربی

### ۱۰- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عددی و تجربی برخورد و نفوذ یک پرتابه سرتخت فولادی در اهداف دوگانه با لایه رویی SIC و لایه پشتیبان آلومینیوم پرداخته شده است. نتایج عددی با استفاده از نرم‌افزار Autodyn و تست تجربی مقایسه شده است. نتایج آرایه شده در این مقاله می‌تواند زمینه‌ساز مطالعات بعدی در زمینه نفوذ مایل در اهداف چندلایه باشد. نتایج تحقیق نشان داد که با سرعت ۷۰۰ متر بر ثانیه، پرتابه سرتخت

- 17- Tahmaseiabdar M, Liaghat GH, Shanazari H, Khodadadi A, Hadavinia H, Abotorabi A. Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting a modified theory. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(9):353-359. [Persian]
- 18- Senthil K, Iqbal MA, Bhargava P, Gupta NK. Experimental and numerical studies on mild steel plates against 7.62 API projectiles. *Procedia Engineering*. 2017;173:369-374.
- 19- Shanazari H, Liaghat GH, Feli S, Hadavinia H. Analytical and experimental study of high-velocity impact on ceramic/nanocomposite targets. *Journal of Composite Materials*. 2017;51(27):3743-3756.
- 20- Tria DE, Trębiński R. Methodology for experimental verification of steel armour impact modelling. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;100:102-116.
- 21- Venkatesan J, Iqbal MA, Gupta NK, Bratov V, Kazarinov N, Morozov F. Ballistic characteristics of bilayered armour with various aluminium backing against ogive nose projectile. *Procedia Structural Integrity*. 2017;6:40-47.
- 22- Venkatesan J, Iqbal MA, Madhu V. Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon carbide/aluminium armours. *Procedia Engineering*. 2017;173:671-678.
- 23- Wang Q, Zhang H, Cai H, Fan Q, Li G, Mu X. Simulation analysis of co-continuous ceramic composite dynamic mechanical performance and optimization design. *Computational Materials Science*. 2017;129:123-128.
- 24- Zaera R, Sánchez-Sáez S. Investigate and penetrate the ceramic gold leaf AP projectiles with caliber 7.62 with tungsten core, against alumina and aluminum support plate. 21<sup>th</sup> International Ballistics Symposium, San Antonio, Texas, USA. Lancaster: Technomic Pub. Co; 2017.
- 25- Yi RC, Yin LK, Wang JR, Chen ZG, Hu DQ. Study on the performance of ceramic composite projectile penetrating into ceramic composite target. *Defence Technology*. 2017;13(4):295-299.
- 26- Zhang X, Serjouei A, Sridhar I. Criterion for interface defeat to penetration transition of long rod projectile impact on ceramic armor. *Thin-Walled Structures*. 2018;126:266-284.
- 27- Das S, Ronan W, Wadley HNG, Deshpande VS. Penetration of confined ceramics targets. *Extreme Mechanics Letters*. 2018;18:45-57.
- 28- Savio SG, Madhu V. Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;113:161-167.
- the foam core sandwich panels with aluminum face-sheets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*. 2017;233(1):285-298.
- 5- Wilkins. Significant numerical analysis of ceramic targets by and colleagues [Internet]. Alexandria: U.S. Patent and Trademark Office; 2013 [cited 2018 May 01]. Available from: Not Found
- 6- Cortes R, Navarro C, Martinez MA, Rodriguez J, Sanchez-Galvez V. Numerical modelling of normal impact on ceramic composite armours. *International Journal of Impact Engineering*. 1992;12(4):639-650.
- 7- 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.
- 8- Florence AL, Ahrens TJ. Interaction of projectiles and composite armor: Part I final report. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center; 1967.
- 9- Woodward RL. A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *International Journal of Impact Engineering*. 1990;9(4):455-474.
- 10- Den Reijer PC. Impact on ceramic faced armour [Dissertation]. Delft: Delft University of Technology; 1991.
- 11- Chocron-Benloulo IS, Rodriguez J, Sánchez-Gálvez V. A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic impact behavior. *Textile Research Journal*. 1997;67(7):520-528.
- 12- Zaera R, Sánchez-Sáez S, Sánchez-De La Sierra M, Pérez-Castellanos JL, Navarro C. Influence of the adhesive in the ballistic performance of ceramic faced plate armours. 18th International Symposium on Ballistics : proceedings : Ballistics '99 Symposium, San Antonio, Texas, 15-19 November 1999. Lancaster: Technomic Pub. Co; 1999.
- 13- Li K, Goldsmith W. Perforation of steel and polycarbonate plates by tumbling projectiles. *International Journal of Solids and Structures*. 1997;34(35-36):4581-4596.
- 14- Sastry SR, Simha LU. Environmental evaluation and assessment of ceramic manufacturing systems. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 2002;61(3):135-140.
- 15- Feli S, Aalami Aalegha ME, Ahmadi Z. A new analytical model of normal penetration of projectiles into the light-weight ceramic-metal targets. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(5):561-567.
- 16- Alizadeh M, Vahedi K. Analytical and numerical investigation of penetration of conical projectiles into FML targets. *Aerospace Mechanics*. 2015;10(4):75-85. [Persian]