



## New Analytical Model Presentation and Numerical Investigation of Ballistic Impact on Ceramic/Metal Semi-Infinite Perforated Targets

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Sayah Badkhor M.<sup>1</sup> MSc,  
Vahedi Kh.\*<sup>1</sup> PhD,  
Naddaf Oskouei A.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Sayah Badkhor M, Vahedi Kh, Naddaf Oskouei A. New Analytical Model Presentation and Numerical Investigation of Ballistic Impact on Ceramic/Metal Semi-Infinite Perforated Targets. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1127-1143.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. Postal Code: 1698715861  
Phone: +98 (21) 334521596  
Fax: -  
khvahedi@ihu.ac.ir

#### Article History

Received: July 25, 2019  
Accepted: October 04, 2019  
ePublished: May 09, 2020

### ABSTRACT

Efforts to reduce the ballistic effects and achieve the good results have always been important. In this article, perforated targets were used in order to reduce the penetration depth of projectile. The use of these targets in the case of high-speed projectiles reduces the number of parameters, such as penetration depth, cost of target products, and target area density. The goal of this paper was to present a new and complete analytical model for projectile penetration in ceramic/metal semi-infinite perforated targets, based on the Fellows analytical model, one of the most important models for penetration. First, the Fellows model was modified for ceramic/metal semi-infinite none-perforated targets. This modified model, while perfectly improving the results of the penetration depth at low speeds and had a better fit with experimental results at high speeds. In the new analytical model, 7 different states were considered for the projectile to impact the perforated target. In each of these states, the angle of oblique and the speed of the projectile after reaching the metal varied with respect to the ceramic thickness and the speed of the projectile's impact. Regarding the oblique impact on the metal, corrected relations were rewritten for new conditions. Finally, the depth of penetration was achieved according to the target conditions. The numerical simulation in Abaqus software was used to compare the results. The results of the new analytical model has good agreement with numerical simulation.

**Keywords** Projectile Penetration; Hybrid Targets; Numerical Simulation; Perforated Targets

### CITATION LINKS

[1] Interaction of projectiles and composite ... [2] A theory for the deceleration of long rods after ... [3] Mechanics of penetration and ... [4] Mechanics of penetration: analysis and ... [5] The mechanics of penetration of projectiles into ... [6] Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid ... [7] Hypervelocity penetration of ... [8] A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour ... [9] Impact on ceramic faced ... [10] Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight ... [11] Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite ... [12] Modern armour configurations ... [13] Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical ... [14] Perforation of a thick plate by rigid ... [15] Oblique perforation of thick metallic plates by rigid ... [16] More on the ricochet of eroding long rods—Validating the analytical model with ... [17] Wire fence as applique ... [18] Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic ... [19] Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic ... [20] Optimization of geometrical characteristics of perforated ... [21] Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing ... [22] Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical ... [23] On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse ... [24] Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface ... [25] Influence of add-on perforated plates on the protective performance of light-weight ... [26] A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high ... [27] Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and ... [28] Analysis of the high speed sliding interaction between titanium alloy and ... [29] Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate ... [30] Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model ... [31] A FEM study of explosive welding of double layer ...

## ارایه یک مدل تحلیلی جدید و بررسی عددی ضربه بالستیک در اهداف سوراخ‌دار نیمه‌بی‌نهایت سرامیک/فلز

مصطفی سیاح‌بادخور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>۴</sup>، تهران، ایران

خداداد واحدی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>۴</sup>، تهران، ایران

علیرضا نداف اسکوئی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین<sup>۴</sup>، تهران، ایران

### چکیده

تلاش برای کاهش اثرات بالستیک پرتابه و دستیابی به نتایج منطقی همواره اهمیت داشته است. در این مقاله به منظور کاهش عمق نفوذ پرتابه از اهداف سوراخ‌دار استفاده شد. استفاده از این اهداف در برخورد پرتابه‌های با سرعت بالا موجب کاهش مواردی از قبیل عمق نفوذ، هزینه نهایی ساخت هدف و چگالی سطحی هدف می‌شود. هدف این مقاله، ارایه یک مدل تحلیلی جدید و کامل برای نفوذ پرتابه در اهداف سوراخ‌دار نیمه‌بی‌نهایت سرامیک/فلز، براساس مدل تحلیلی فلوز که یکی از مدل‌های مهم و اساسی در زمینه نفوذ است، بود. ابتدا مدل فلوز که برای اهداف بدون سوراخ اما بی‌نهایت سرامیک/فلز است، مورد اصلاح قرار گرفت. این مدل اصلاحی ضمن بهبود کامل نتایج عمق نفوذ در سرعت‌های پایین، تطابق بهتری با نتایج تجربی در سرعت‌های بالا نیز دارد. در مدل تحلیلی جدید، ۷ حالت مختلف برای برخورد پرتابه به سوراخ در نظر گرفته شد. در هر کدام از این حالت‌ها، زاویه تمایل و سرعت پرتابه بعد از رسیدن به فلز با توجه به ضخامت سرامیک و سرعت برخورد پرتابه متغیر بود. با در نظر گرفتن نفوذ مایل در فلز، روابط اصلاح‌شده برای شرایط جدید بازنویسی شد. در نهایت، عمق نفوذ با توجه به شرایط هدف به دست آمد. به منظور مقایسه نتایج از فرآیند شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. نتایج مدل تحلیلی جدید با شبیه‌سازی عددی مطابقت قابل قبولی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** نفوذ پرتابه، اهداف ترکیبی، شبیه‌سازی عددی، اهداف سوراخ‌دار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۲

\*نویسنده مسئول: khvahedi@ihu.ac.ir

### ۱- مقدمه

نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی به‌منظور کاهش اثرات بالستیک آن از مسایل پرکاربرد در علم مکانیک نفوذ است. دستیابی به هدفی با قدرت بازدارندگی بالا و در عین حال سبک، کم‌هزینه و مقاوم اهمیت بسیار بالایی دارد. اهداف ترکیبی معمولاً به‌صورت یک جنس ترد و مقاوم با یک جنس نرم و تغییر شکل‌پذیر در کنار هم استفاده می‌شوند. بعد از برخورد پرتابه به جنس ترد و کاهش شدت ضربه، وارد جنس نرم که وظیفه جلوگیری از متلاشی‌شدن جنس ترد را در کنار کاهش عمق نفوذ با جذب انرژی پرتابه دارد،

می‌شود. افزایش ضخامت یکی از راه‌های کاهش عمق نفوذ است اما، در بیشتر موارد استفاده از این اهداف، محدودیت افزایش ضخامت وجود دارد. استفاده از اهداف سوراخ‌دار ضمن کاهش جرم، کاهش هزینه و ثابت نگه‌داشتن ضخامت، موجب بهبود عملکرد هدف با ایجاد حرکت مایل پرتابه در داخل هدف می‌شود.

فلورنس و /هرتز، در سال ۱۹۶۷، به بررسی تحلیلی و تجربی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک/فلز پرداختند<sup>[1]</sup>. در همین سال تیت، تئوری برای نفوذ پرتابه‌های میله بلند در اهداف ترکیبی سرامیک/فلز براساس نظریه هیدرودینامیک اصلاح‌شده، ارایه کرد<sup>[2]</sup>. در سال ۱۹۷۸، ویلکینز، یک مدل یک‌بعدی ساده برای نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک/کامپوزیت ارایه کرد. این مدل تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی عددی و تجربی داشت<sup>[3]</sup>. جوناس و زوکاس نیز در سال ۱۹۷۸، به بررسی مدل‌های تحلیلی در کنار شبیه‌سازی عددی برای سرعت پرتابه‌های در بازه ۵٪ تا ۲۰ کیلومتر بر ثانیه پرداختند<sup>[4]</sup>. در همین سال، بکمن و گلدسمیت، مدلی کامل از نفوذ پرتابه در هدف ارایه کرد. آنها ضمن ارایه این مدل، مسیری برای آینده علم نفوذ پرتابه در هدف پیش‌بینی نمودند که هنوز نیز مورد توجه نویسندگان این زمینه قرار دارد<sup>[5]</sup>. رابید و بادنر در سال ۱۹۸۳، برای نفوذ یک پرتابه صلب در هدف ویسکوپلاستیک یک مدل ۵ مرحله‌ای ارایه کردند<sup>[6]</sup>. بلس و همکاران در سال ۱۹۸۷، نفوذ پرتابه‌هایی با جنس‌های متفاوت را در اهداف دولایه سرامیک‌های متفاوت مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آنها در بسیاری از مقالات به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی و عددی مورد استفاده قرار گرفته است<sup>[7]</sup>. در سال ۱۹۹۰، وودوارد یک ایده بسیار خوب برای بررسی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک/فلز ارایه کرد. او با روش انباشت جرم و در نظرگرفتن سایش مربوط به هدف و پرتابه، مدلی تحلیلی ارایه کرد<sup>[8]</sup>. دن ریچر در سال ۱۹۹۱، مدل وودوارد را توسعه داد و تحلیل دقیق‌تری را در نظرگرفتن جزئیات انجام داد<sup>[9]</sup>. در سال ۱۹۹۷، زائر و گالوز، یک مدل کاملاً تحلیلی از ضربه بالستیک قائم و مایل روی اهداف ترکیبی سرامیک/فلز ارایه کردند. این مدل براساس معادله الکسیوسکی و تیت برای نفوذ پرتابه به داخل سرامیک است در حالی که حل مربوط به فلز پشتیبان براساس ایده مدل‌های وودوارد و دن ریچر است<sup>[10]</sup>. در سال ۱۹۹۹، فلوز و بارتن، یک مدل تحلیلی از نفوذ پرتابه تغییر شکل‌پذیر در اهداف ترکیبی سرامیک/فلز ارایه کردند. مدل آنها برای اهداف نیمه بی‌نهایت ارایه شده بود. این مدل عمق نفوذ را با دقت خیلی خوبی نسبت به سایر مدل‌های تحلیلی ارایه‌شده تا آن زمان، پیش‌بینی نموده بود<sup>[11]</sup>. در سال ۱۹۹۹، دایرن و همکاران به بررسی زره‌های جدید در برابر نفوذ پرتابه پرداختند. آنها با ایجاد سوراخ در صفحات فولادی و ایجاد فاصله تا هدف اصلی، آزمایش‌های تجربی را انجام دادند<sup>[12]</sup>.

بیشتر مدل‌های تحلیلی با توجه به عدم دسترسی به کامپیوترهای پیشرفته و امکانات آزمایشگاهی مناسب تا بیش از سال ۲۰۰۰ ارایه

و دایره‌ای استفاده کردند و میزان خرابی در گلوله‌های مختلف را در اثر برخورد به مراکز این سوراخ‌ها مقایسه نمودند [25].

در این مقاله به ارایه یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه سرتخت در اهداف ترکیبی سوراخدار نیمه بی‌نهایت پرداخته شده است. این اهداف قابلیت کاهش عمق نفوذ و چگالی سطحی را در کنار عدم توجه به ضربه‌زننده برای ایجاد برخورد مایل دارند. همان طور که از بخش مقدمه مشخص است، تاکنون مدل تحلیلی برای این اهداف ارایه نشده است. بررسی در مورد این اهداف، فقط به اهداف فلزی با انجام آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی محدود می‌شود، بنابراین نتایج تجربی و عددی قابل قبولی هم در این زمینه وجود ندارد. بدین منظور ابتدا مدل تحلیلی فلوز که برای اهداف ترکیبی نیمه بی‌نهایت سرامیک/فلز است، مورد اصلاح قرار گرفته است تا ضمن بهبود نتایج، درک خوبی هم از فرآیند نفوذ در اهداف ترکیبی انجام گیرد. با در نظر گرفتن ۷ حالت مختلف برای برخورد پرتابه به سرامیک سوراخدار، احتمال هرگونه برخورد دیگر، پوشش داده شده است. در این حالت‌ها، سرعت برخورد پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان و زاویه تمایل آن محاسبه شده است. با داشتن این اطلاعات مرحله آخر نفوذ که مربوط به نفوذ در درپشتیبان فلزی است با مدل اصلاح شده فلوز و محاسبه عمق نفوذ مستقیم و تبدیل آن به عمق نفوذ مایل، مقدار عمق نفوذ نهایی به‌دست آمده است. به‌منظور مقایسه نتایج از شبیه‌سازی عددی فرآیند برخورد در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

## ۲- مدل تحلیلی جدید

در این بخش به بیان مدل اصلاحی تحلیلی فلوز برای اهداف ترکیبی بدون سوراخ و مدل تحلیلی جدید برای اهداف ترکیبی سوراخدار پرداخته شده است.

### ۲-۲- مدل اصلاحی تحلیلی

مدل فلوز یکی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین مدل‌های تحلیلی مربوط به نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک/فلز است. این مدل بیش‌ترین جنبه‌ها و شرایط مربوط به نفوذ پرتابه در هدف را در نظر می‌گیرد. در این مدل با استفاده از خواص مواد و در نظرگرفتن تغییرات پرتابه و هدف در طی نفوذ، عمق نفوذ را پیش‌بینی می‌کند. در ادامه ضمن بیان برخی از روابط این مدل، فلوچارتی از مراحل حل و تعیین عمق نفوذ آمده است. فلوز برای تعیین عمق نفوذ دو مرحله در نظر گرفته است: نفوذ اولیه و نفوذ ثانویه. بخش اصلی نفوذ پرتابه در هدف، مربوط به مرحله نفوذ اولیه است. در شکل ۱، مدل تحلیلی مربوط به جرم‌های خردشده و نیروهای متقابل بین پرتابه، سطح پرتابه ساییده شده، سطح جلوی سرامیک ساییده شده، سرامیک، سطح پشتی سرامیک ساییده شده، سطح پشتیبان ساییده شده و پشتیبان نشان داده شده است [11].

شده است. بعد از این سال، مدل‌های ارایه شده در کنار روابط تحلیلی، توجه ویژه‌ای به شبیه‌سازی عددی و کارهای آزمایشگاهی داشته است. در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳، چن و لی به ارایه یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های صلب در اهداف فلزی پرداختند. آنها در تحلیل خود هندسه دماغه پرتابه‌ها را متفاوت در نظر گرفتند [13, 14]. چن و همکاران در سال ۲۰۰۶، نیز یک مدل تحلیلی برای نفوذ مایل در اهداف فلزی ضخیم ارایه کردند [15]. در سال ۲۰۰۷، روزنبرگ و همکاران به بررسی پدیده کمانش در برخورد پرتابه در اهداف فولادی پرداختند و مدلی تحلیلی را به‌دست آوردند، سپس با شبیه‌سازی عددی نیز، زاویه کمانش را تعیین کردند [16]. بالوس و همکاران در سال ۲۰۰۹، به بررسی زره‌هایی با پوشش حصارهای فلزی پرداختند. آنها تاثیر برخورد پرتابه به حصار و تغییر آرایش قرارگیری این حصار بر روی شکل نفوذ در فلز پشتیبان را بررسی کردند [17]. آنها در همین سال در بررسی دیگری، تاثیر خواص مکانیکی هدف‌های فلزی، اندازه سوراخ روی این اهداف و زاویه قرارگیری آنها نسبت به پرتابه را از نظر بالستیکی تحقیق نمودند. آنها نتایج خود را با آزمایش‌های تجربی به‌دست آوردند و دریافتند که فلز نرم‌تر اثرات بالستیکی بهتری دارد [18]. در سال ۲۰۱۲، مشیر و همکاران به بررسی تاثیر اندازه و شکل سوراخ‌ها بر روی میزان خرابی اهداف فولادی در برخورد با پرتابه پرداختند. آنها نشان دادند که اهداف سوراخدار در حدود ۱۶٪ کارایی بالستیکی بیشتری دارد [19]. در همین سال رادیسالو و جویچ و همکاران به بهینه‌سازی صفحات سوراخدار پرداختند. اندازه سوراخ‌ها، هم‌پوشانی پرتابه با سوراخ و زاویه صفحه سوراخدار با راستای پرتابه از موارد مورد بررسی بوده است. مهم‌ترین نتیجه آنها این بود که هم‌پوشانی بیشتر پرتابه و سوراخ موجب کاهش بیشتر عمق نفوذ می‌شود [20]. در سال ۲۰۱۴، کلیک و همکاران به بررسی تجربی و عددی تاثیر سوراخ‌های دایره‌ای شکل بر روی اهداف فولادی در مقابل نفوذ پرتابه پرداختند. آنها با ساخت هدف دولایه فولادی و سوراخ کردن هدف جلویی به بررسی میزان عمق نفوذ در این اهداف پرداختند و نتیجه گرفتند که ایجاد سوراخ، باعث حرکت مایل پرتابه و کاهش عمق نفوذ می‌شود [21]. در سال ۲۰۱۷، بابایی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی نفوذ پرتابه کروی صلب در صفحات با تغییر شکل‌های زیاد پرداختند [22]. آنها در همان سال در کاری جداگانه 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 [23]. در سال ۲۰۱۷، کلیک و همکاران به بهینه‌سازی هدف سوراخداری که قبلاً ارایه کرده بودند، پرداختند. آنها پارامترهای از جمله فاصله هوایی بین دولایه، قطر سوراخ و فاصله بین مراکز سوراخ‌ها را در این بهینه‌سازی در نظر گرفتند [24]. در سال ۲۰۱۸، فراس و فادرل به بررسی خرابی گلوله در اهداف سوراخدار فولادی با تغییر در شکل سوراخ پرداختند. آنها در آزمایش تجربی خود از سوراخ‌های بیضوی

بنابراین سرعت آن تحت تاثیر نیروهایی است که بر سرامیک اعمال می‌شود [11]:

$$F_C - F_{C2} = M_C \ddot{X}_C \quad (7)$$

$$F_{C2} = \sigma_{CES} A_1 \quad (8)$$

$$\dot{X}_C = \dot{X}_{OC} \quad (9)$$

معادلات مربوط به تقابل بین ماده پشتیبیان و سرامیک مشابه معادلات مربوط به تقابل پرتابه و سرامیک است [11].

$$F_{I2} - F_B = \frac{\Delta M_B \ddot{X}_{BF}}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\Delta M_{C2} = (\dot{X}_C - \dot{X}_{BF}) \Delta t \rho_C A_1 \quad (11)$$

$$\Delta M_B = (\dot{X}_{BF} - \dot{X}_B) \Delta t \rho_B A_1 \quad (12)$$

$$\dot{X}_{BF} = \dot{X}_{BE} + \dot{X}_B \quad (13)$$

$$F_B = \sigma_{BES} A_1 \quad (14)$$

آنچه فلوز در مدل خود ارایه کرد، روابط کلی از هر قسمت نفوذ پرتابه در هدف است. به منظور بهبود مدل تحلیلی فلوز، اصلاحاتی انجام شده که در این بخش به بیان آنها پرداخته شده است.

### ۲-۱-۲- اصلاح سرعت پرتابه

سرعت پرتابه در تمام مراحل نفوذ تاثیرگذار است و اصلاح این سرعت در هر بازه زمانی از مراحل نفوذ، در محاسبه سایر پارامترها نیز موثر است. از لحظه برخورد پرتابه به هدف، بازه‌های زمانی تعریف شده، مشخص می‌شوند ( $\Delta t$ ). در هرکدام از این بازه‌ها، تغییرات سرعت پرتابه به کمک روابط زیر مشخص و در تعیین سایر پارامترها و مقدار عمق نفوذ همان بازه زمانی نیز، مورد استفاده قرار می‌گیرند [2]:

$$\frac{1}{2} \rho_t U^2 + R_t = \frac{1}{2} \rho_p (V - U)^2 + Y_p \quad (15)$$

$$U = \frac{1}{1 - \mu^2} \left[ V - \mu \sqrt{(V^2 + A)} \right] \quad (16)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_p}}, \quad A = 2 \frac{(R_t - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_t} \quad (17)$$

$$Y_p = -\rho_p l \frac{dv}{dt} \quad (18)$$

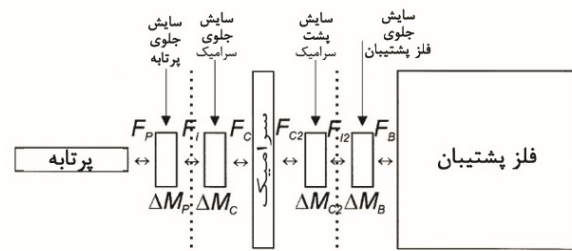
$$(\dot{X}_p - \dot{X}_{OP}) \rho_p L_p = - \left( \sigma_C + \frac{1}{2} \rho_C \dot{X}_{OP}^2 \right) \Delta t \quad (19)$$

### ۲-۱-۲- اصلاح نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی

بعد از برخورد پرتابه به سرامیک، مخروط سرامیکی تشکیل می‌شود. این مخروط تا زمان سایش کامل آن به همراه پرتابه به داخل فلز پشتیبیان نفوذ می‌کند. بنابراین اصلاح نیم‌زاویه تشکیل این مخروط در مقدار عمق نفوذ از زمان تشکیل آن تا فرسایش کامل آن موثر است. در مدل فلوز زاویه تشکیل مخروط سرامیکی ثابت در نظر گرفته شده است. این زاویه برحسب رادیان برای پرتابه با سرعت کمتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه از رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$\varphi = \left( \frac{\dot{X}_p - 220}{780} \right) \frac{34\pi}{180} + \frac{34\pi}{180} \quad (20)$$

فلوز بیان می‌کند که تغییرات  $\varphi$  به صورت خطی بین ۳۴ تا ۶۸ درجه برای سرعت‌های ۲۲۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند و برای سرعت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه است. تاثیر تغییر نیم‌زاویه مخروط سرامیکی با سرعت برخورد در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱) نمایش نیروهای تقابل بین پرتابه، سرامیک و پشتیبیان [11]

برای بیان مدل اصلاحی، فرضیاتی در نظر گرفته شده است:

۱- فرآیند نفوذ به صورت پایدار فرض شده است و از لحظه برخورد شروع می‌شود. یک مرحله انتقالی در شروع فرآیند وجود دارد که این مرحله برای پرتابه‌های با نوک تخت کوتاه است. در طی این مرحله انتقالی که قبل از شروع سایش پایدار پرتابه است، پرتابه به داخل هدف نفوذ خواهد داشت.

۲- نیروی برخورد بر روی فلز پشتیبیان به وسیله مخروط سرامیکی وارد می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرات زاویه تشکیل مخروط سرامیکی با سرعت برخورد، مقدار نیروی وارد بر فلز پشتیبیان نیز تغییر خواهد کرد. در سرعت‌های بالا با توجه به سایش سریع سرامیک، این زاویه نیز تاثیر در مقدار نیروی وارد بر فلز پشتیبیان و عمق نفوذ نخواهد داشت.

۳- رفتار مکانیکی پرتابه و هدف به صورت رفتار واقعی آنها در نظر گرفته شده است. و برای پرتابه سه حالت سایش، قارچی شدن و صلب در نظر گرفته شده است که در هر مرحله از مسیر نفوذ در حالت مشخصی قرار خواهد داشت.

در مدل فلوز نیروی تقابل بین پرتابه و سرامیک از روابط (۱) تا (۷) به دست می‌آید. این روابط نیروی تقابل بین بخش‌های مختلف هدف و سرامیک را بعد از برخورد، مطابق شکل ۱ بیان می‌کند [11].

$$F_p = -M_p \ddot{X}_p \quad (1)$$

$$F_i - F_c = \frac{\Delta M_C \ddot{X}_{CF}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\Delta M_p = (\dot{X}_p - \dot{X}_{CF}) \Delta t \rho_p A_0 \quad (3)$$

$$\Delta M_c = (\dot{X}_{CF} - \dot{X}_c) \Delta t \rho_c A_0 \quad (4)$$

$$F_c = \sigma_{CES} A_0 \quad (5)$$

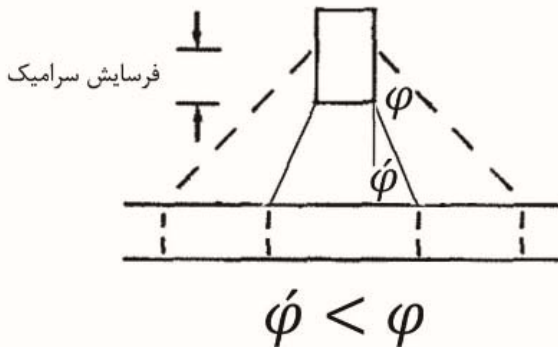
$$F_p = \sigma_{PES} A_0 \quad (6)$$

$$\dot{X}_{CF} = \dot{X}_{CE} + \dot{X}_c \quad (7)$$

این روابط نیروی تقابل بین بخش‌های مختلف هدف و سرامیک را بعد از برخورد، مطابق شکل ۱ بیان می‌کند. در واقع هرکدام از قسمت‌ها مثلا سرامیک به سه بخش تقسیم می‌شود. بخش جلوی سرامیک، سرامیک و پشت سرامیک. هرکدام از این بخش با قسمت‌های بعدی و قبلی خود که در تماس هستند، نیروهای عمل و عکس‌العمل دارند. روابط ۱ تا ۷ مربوط به نیروهای متقابل برای پرتابه با سرامیک و سرامیک با خودش است. جرم کاهش یافته پرتابه و جرم کاهش یافته سرامیک نیز در این روابط محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن این شرایط و ترکیب معادلات، سرعت جلوی سرامیک تعیین خواهد شد. شتاب سرامیک و

در صورت فرسایش کامل سرامیک مقدار این نیم‌زاویه در مدل فلوز برابر ۳۴ درجه است. بنابراین از رابطه زیر در صورت تکمیل شدن زمان تشکیل مخروط سرامیکی و فرسایش سرامیک استفاده می‌شود:

$$\varphi_{new} = \frac{\varphi - 34}{t_c} (t_c - x) + 34 \quad (22)$$



شکل ۳) تاثیر کاهش نیم‌زاویه مخروط شکست با کاهش ضخامت سرامیک

### ۳-۱-۲- اصلاح مقاومت سرامیک در مقابل نفوذ پرتابه

مقاومت سرامیک به‌عنوان یک پارامتر مهم از لحظه برخورد پرتابه تا سایش کامل آن در محاسبه عمق نفوذ موثر است. مقدار این مقاومت در طول فرآیند نفوذ با توجه به خاصیت ترد بودن سرامیک، نیز متغیر است. در مدل فلوز مقدار مقاومت سرامیک در فرآیند نفوذ ثابت در نظر گرفته شده است. در لحظه برخورد پرتابه به هدف، مقدار این مقاومت بیشترین مقدار خود یعنی مقاومت سرامیک سالم است. با گذشت زمان و پیشروی پرتابه در هدف این مقدار کاهش خواهد یافت. در هر صورت مقاومت سرامیک خرد شده کمتر از مقاومت سرامیک سالم است. بعد از تشکیل اولین مخروط سرامیکی، مقاومت سرامیک از رابطه زیر به‌دست می‌آید [10]:

$$Y_C = Y_{CO} \left( \frac{u - w}{u_{phase1}} \right) \quad (23)$$

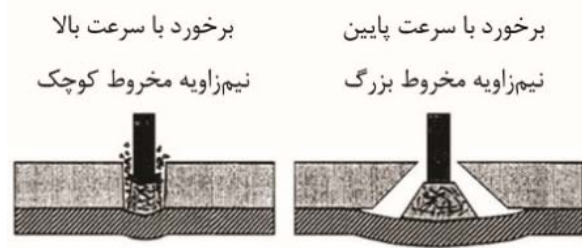
این مقاومت تا انتهای فرآیند نفوذ در سرامیک به‌جای مقاومت سرامیک سالم استفاده می‌شود.

### ۳-۱-۲- اصلاح جرم سرامیک

جرم سرامیک در محاسبه سرعت‌های مربوط به سرامیک و نیروی وارد از طرف آن به فلز پشتیبان و همچنین مقدار سایش سرامیک موثر است. در هر مرحله از فرآیند نفوذ این جرم باید محاسبه شود. در مدل فلوز منظور از جرم سرامیک، جرم محدود شده به مخروط سرامیکی است. این جرم در هر بازه زمانی با محاسبه جرم کاهش‌یافته سرامیک از جرم اولیه سرامیک به‌دست می‌آید [11]:

$$\Delta M_C = (\dot{X}_{CF} - \dot{X}_C) \Delta t \rho_C A_0 \quad (24)$$

$$M_C = M_{CO} - \Delta M_C \quad (25)$$



شکل ۲) تغییر نیم‌زاویه شکست مخروطی در سرعت‌های مختلف

زاویه تشکیل مخروط سرامیکی با سرعت برخورد پرتابه، ضخامت سرامیک و زمان تشکیل مخروط سرامیکی، تغییر می‌کند. تشکیل مخروط سرامیکی در فرآیند نفوذ بسیار موثر است. بنابراین تعیین نیم‌زاویه تشکیل این مخروط و سطح مقطع انتهایی آن در مقدار عمق نهایی نفوذ تاثیرگذار است.

مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی با سرعت برخورد پرتابه رابطه دارد و در سرعت‌های برخورد مختلف مقدار این زاویه تغییر می‌کند. فلورانس در مدل خود مقدار این زاویه را ثابت و برابر ۶۳ درجه و فلوز نیز برابر ۶۸ درجه در نظر گرفته بودند. در واقع مقدار این زاویه با افزایش سرعت برخورد کاهش می‌یابد. در شکل ۴ تغییرات این زاویه با سرعت نشان داده شده است. در اصلاح مقدار این نیم‌زاویه مخروط سرامیکی از رابطه خطی (۲۱)، مقدار  $\varphi$  برحسب درجه به‌دست می‌آید:

$$\varphi = \frac{5}{400} [-\dot{X}_P + 1000] + 63 \quad (21)$$

در این رابطه مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی بین ۶۸ تا ۶۳ درجه به‌صورت خطی تغییر می‌کند. علامت منفی در رابطه بالا برای کاهش مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی در سرعت‌های بیشتر است. بدین‌صورت که برای پرتابه با سرعت ۱۰۰۰ متر بر ثانیه مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی را برابر ۶۳ درجه و با سرعت ۶۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه می‌توان محاسبه کرد. در سرعت‌های بالای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه مقدار این زاویه برابر ۶۳ درجه و در سرعت‌های کمتر از ۶۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه است.

با پیشروی پرتابه در سرامیک و فرسایش آن، نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی تغییر خواهد کرد. با توجه به اینکه تغییرات نیم‌زاویه مخروط سرامیکی برای سرعت‌های بالای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۳ درجه، برای سرعت‌های کمتر از ۶۰۰ متر بر ثانیه ۶۸ درجه و برای سایر سرعت‌ها به‌صورت خطی بین ۶۳ تا ۶۸ درجه تغییر می‌کند بنابراین در صورت فرسایش سرامیک بعد از زمان کامل شدن تشکیل مخروط سرامیکی مقدار این نیم‌زاویه تغییر خواهد کرد. با توجه به گذشت زمان و پیشروی پرتابه، سرعت آن کمتر خواهد شد، بنابراین این نیم‌زاویه از مقدار اولیه خود بیشتر خواهد شد اما، کاهش ضخامت سرامیک منجر به کاهش بیشتر این نیم‌زاویه خواهد شد که نتیجه نهایی کاهش نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی است (شکل ۳).

مقدار سایش فلز پشتیبان محاسبه شود. تا زمانی که هنوز سرامیک به‌طور کامل سایش نیافته باشد، این مقدار کوچک است. در مواردی که پشتیبان دچار سایش می‌شود، فلوز از معادله (۱۲) مقدار کاهش جرم پشتیبان را محاسبه می‌کند. در هنگام سایش پشتیبان مقادیر سرعت پشتیبان و سرعت قسمت جلوی آن متغیر است. بنابراین برای افزایش دقت محاسبه کاهش جرم پشتیبان در مدل اصلاحی مقادیر این سرعت‌ها توسط یک رابطه خطی به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\dot{X}_B = \frac{\dot{X}_{B2} - \dot{X}_{B1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{B1} \quad (۳۲)$$

$$\dot{X}_{BF} = \frac{\dot{X}_{BF2} - \dot{X}_{BF1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{BF1} \quad (۳۳)$$

این روابط با در نظر گرفتن تغییرات سرعت نسبت زمان که برابر است با شتاب، برای فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان به‌دست آمده است. بنابراین برای محاسبه مقدار کاهش جرم فلز پشتیبان ابتدا به کمک روابط (۳۲) و (۳۳) مقادیر سرعت‌های فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان محاسبه می‌شود. سپس با جایگذاری این مقادیر در معادله (۱۲) و انتگرال‌گیری در بازه زمانی موردنظر، مقدار کاهش جرم فلز پشتیبان محاسبه می‌شود.

#### ۲-۲- مدل تحلیلی برای اهداف سوراخ‌دار

در این بخش به بررسی عمق نفوذ در اهداف ترکیبی سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت سرامیک فلز پرداخته شده است. مشخصات پرتابه و هدف مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

فلز پشتیبان از جنس Al 7039 با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر مکعب



شکل ۴) نمایی از پرتابه و هدف

پرتابه از جنس فولادی AISI 4340 و اهداف نیمه بی‌نهایت از جنس سرامیک آلومینا ۹۹/۵٪ و آلومینیوم سری ۷۰۰۰ هستند. به‌منظور مقایسه نتایج خروجی و با توجه به ضخامت هدف که نیمه بی‌نهایت است، عمق نفوذ مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجایی که هندسه سطح مقطع پرتابه و سوراخ دایره هستند، بنابراین در برخورد پرتابه با سوراخ، حالت‌های مختلفی وجود دارد. ۷ حالت از بین حالت‌های بی‌شمار در جدول ۱، در نظر گرفته شده است. برای سایر حالت‌ها نیز می‌توان به همین صورت که در ادامه

در این کاهش جرم، مقدار نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی و فرسایش سرامیک در نظر گرفته نشده است. بنابراین به‌منظور اصلاح این رابطه ابتدا مدت‌زمان تشکیل مخروط سرامیکی از رابطه زیر مشخص می‌شود [9]:

$$t_{conoid} = 6 \frac{t_C}{c} \quad (۲۶)$$

در صورتی که بازه‌های زمانی در نظر گرفته‌شده، بزرگ‌تر از زمان تشکیل مخروط سرامیکی باشند، مقدار جرم سرامیک با محاسبه حجم مخروط ناقص به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$V_C = \frac{1}{3} \pi t_C (R^2 + r^2 + Rr) \quad (۲۷)$$

$$M_C = \rho_C \times V_C \quad (۲۸)$$

بنابراین برای محاسبه جرم مخروط سرامیکی ابتدا زمان تشکیل مخروط سرامیکی از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود و با بازه‌های زمانی در نظر گرفته‌شده برای تحلیل، مقایسه می‌شوند. در صورتی که بازه‌های زمانی در نظر گرفته‌شده کوچک‌تر از زمان تشکیل مخروط سرامیکی باشند، از رابطه‌های (۲۴) و (۲۵) برای محاسبه جرم سرامیک جدید استفاده می‌شوند. با تکمیل شدن زمان تشکیل مخروط سرامیکی باید حجم مخروط سرامیک جدید محاسبه شود و دیگر نیازی به کم کردن جرم سرامیک کاهش‌یافته از آن نیست. بنابراین با استفاده از رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) جرم مخروط سرامیکی محاسبه می‌شود.

#### ۵-۱-۲ اصلاح سایش پرتابه

سه حالت برای پرتابه براساس سرعت برخورد و مقاومت آن در نظر گرفته شده است. حالت ابتدایی سایش پرتابه، بعد قارچی شدن و در ادامه حرکت پرتابه صلب است. در هر مرحله از فرآیند نفوذ باید حالت پرتابه مشخص شود. در اثر برخورد پرتابه به سرامیک بخشی از پرتابه دچار سایش می‌شود. در مدل فلوز مقدار سایش به‌وسیله کاهش جرم پرتابه، توسط معادله (۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه تغییرات سرعت پرتابه و سرعت جلوی سرامیک در بازه زمانی  $\Delta t$ ، در نظر گرفته نشده است. به‌منظور اصلاح این رابطه از معادله زیر، مقدار طول پرتابه بعد از سایش محاسبه می‌شود:

$$\frac{dL}{dt} = -(\dot{X}_P - \dot{X}_{CF}) \quad (۲۹)$$

در مدل اصلاحی، برای در نظر گرفتن تغییرات سرعت پرتابه و سرعت جلوی سرامیک از یک معادله خطی برای محاسبه مقادیر این سرعت‌ها استفاده شده است:

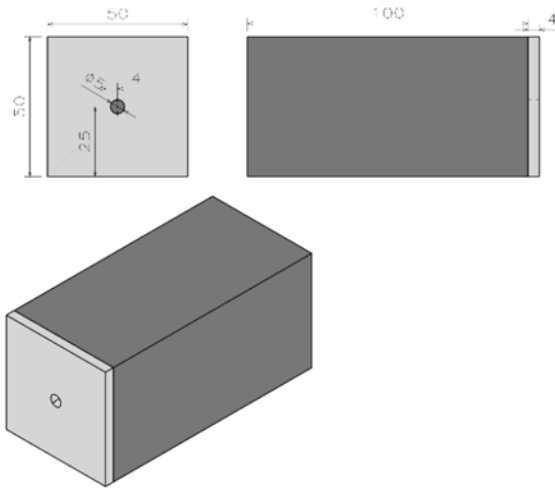
$$\dot{X}_P = \frac{\dot{X}_{P2} - \dot{X}_{P1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{P1} \quad (۳۰)$$

$$\dot{X}_{CF} = \frac{\dot{X}_{CF2} - \dot{X}_{CF1}}{t_2 - t_1}(t - t_1) + \dot{X}_{CF1} \quad (۳۱)$$

با جایگذاری روابط (۳۰) و (۳۱) در معادله (۲۹) و انتگرال‌گیری از آن در بازه ابتدا و انتهای  $\Delta t$  مقدار طول نهایی پرتابه بعد از سایش مشخص می‌شود.

#### ۶-۱-۲ اصلاح کاهش جرم پشتیبان

در آخرین بخش از هر مرحله نفوذ در بازه‌های زمانی مشخص باید



شکل ۵) ابعاد پرتابه و هدف به میلی‌متر

### ۲-۲-۲- برخورد پرتابه به سرامیک

با توجه به شرایط هدف، برخورد پرتابه به آن در ۷ حالت دسته‌بندی می‌شود. این حالت‌ها در جدول ۱ آمده است. در حالتی که سطح مقطع هم‌پوشانی پرتابه و سوراخ، صفر است، با استفاده از مدل فلوز اصلاح شده، موارد بیان شده در بخش ۳، عمق نفوذ محاسبه می‌شود. در هر کدام از ۶ حالت دیگر، پرتابه به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمتی در تماس با سرامیک و قسمتی بدون تماس با سرامیک است. ابتدا، مساحت سطح مقطع هرکدام از این قسمت‌ها محاسبه شده است. در روابط (۳۴)، (۳۵)، (۳۶) و (۳۷) به ترتیب محاسبه سطح مقطع پرتابه، ارتباط بین شعاع پرتابه و سوراخ، محاسبه سطح مقطع پرتابه در تماس با سرامیک و محاسبه سطح مقطع پرتابه بدون تماس با سرامیک نشان داده شده است.

$$A_0 = \pi(PR)^2 \quad (34)$$

$$(PR) = 2(HR) \quad (35)$$

$$A_{PIA} = \pi(PIR)^2 \quad (36)$$

$$A_{PNIA} = A_0 - A_{PIA} \quad (37)$$

در روابط ۳۸ تا ۴۴، سطح مقطع برخورد پرتابه در تماس با سرامیک برای هر یک از ۷ حالت، محاسبه شده است.

$$A_{PIA,1} = A_0 \quad (38)$$

$$A_{PIA,2} = A_0 - \frac{1}{6}\pi(HR)^2 \quad (39)$$

$$A_{PIA,3} = A_0 - \frac{1}{4}\pi(HR)^2 \quad (40)$$

$$A_{PIA,4} = A_0 - \frac{1}{2}\pi(HR)^2 \quad (41)$$

$$A_{PIA,5} = A_0 - \frac{2}{3}\pi(HR)^2 \quad (42)$$

$$A_{PIA,6} = A_0 - \frac{3}{4}\pi(HR)^2 \quad (43)$$

$$A_{PIA,7} = A_0 - \pi(HR)^2 \quad (44)$$

### ۲-۲-۲- برخورد پرتابه بدون تماس با سرامیک

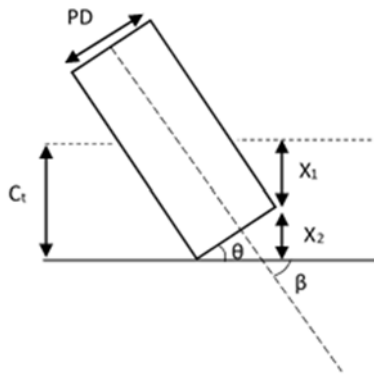
در برخورد پرتابه به سرامیک سوراخ‌دار، بخشی از پرتابه که روی سوراخ قرار می‌گیرد، فرض شده است که بدون هیچ عاملی برای کاهش سرعت و یا سایش آن، به سطح فلز پشتیبان برخورد کند.

بیان شده است، اقدام نمود. در شکل ۵ ابعاد پرتابه و هدف نشان داده شده است.

جدول ۱) حالت‌های برخورد پرتابه با سوراخ در هدف

شماره	شکل پرتابه در قسمت بدون هم‌پوشانی با سوراخ	سطح مقطع هم‌پوشانی پرتابه و سوراخ
۱		0
۲		$1/6 \pi r^2$
۳		$1/4 \pi r^2$
۴		$1/2 \pi r^2$
۵		$2/3 \pi r^2$
۶		$3/4 \pi r^2$
۷		$\pi r^2$

سرعت‌های مختلف، جابجایی‌های متفاوتی نیز خواهند داشت. این جابجایی‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶) پرتابه بعد از سایش کامل سرامیک و رسیدن به پشتیبان

همان طور که از روی این شکل مشخص است، زاویه پرتابه نسبت به فلز پشتیبان بعد از برخورد به هدف سوراخ‌دار در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان از رابطه (۴۷) قابل محاسبه است. با داشتن این زاویه، زاویه تمایل حرکت پرتابه داخل فلز پشتیبان از رابطه (۴۸) به‌دست آمده است.

$$X_1 = \dot{X}_{PIB} t \quad (46)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{X_2}{PD} \right) \quad (47)$$

$$\beta = 90 - \theta \quad (48)$$

### ۲-۲-۵- برخورد پرتابه به فلز پشتیبان

با عبور پرتابه از سرامیک و رسیدن به پشتیبان فلزی باید همه مشخصات پرتابه معلوم باشند. زاویه تمایل حرکت پرتابه که در بخش قبل تعیین شده است. سرعت و طول پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان با استفاده از یک تابع وزنی به‌دست آمده است. هر یک از دو قسمت پرتابه کسری از پرتابه اولیه هستند. این رابطه برای هرکدام از قسمت‌های پرتابه در جدول ۲ آمده است. از این رابطه برای تعیین سایر مشخصات پرتابه به عنوان تابع وزنی، استفاده شده است. سرعت پرتابه در لحظه ورود به فلز پشتیبان از رابطه (۴۹) به‌دست آمده است:

$$\dot{X}_{PB} = \frac{1}{\pi(PR)^2} (A_{PIA} \dot{X}_{PIB} + A_{PNIA} \dot{X}_P) \quad (49)$$

طول پرتابه در لحظه ورود به فلز پشتیبان از رابطه (۵۰) به‌دست آمده است.

$$L_{PB} = \frac{1}{\pi(PR)^2} (A_{PIA} L_{PIE} + A_{PNIA} L_{PNI}) \quad (50)$$

سطح مقطع پرتابه در لحظه رسیدن به فلز پشتیبان با توجه به سایش یکسان سطح مقطع در قسمت برخورد با سرامیک، از رابطه (۵۱) به‌دست آمده است:

$$A_{PB} = A_{PIA} + A_{PNIA} \quad (51)$$

قسمتی از پرتابه که با سطح سرامیک برخورد دارد، بعد از خردکردن سرامیک و حذف آن، مقداری در داخل پشتیبان نفوذ خواهد کرد ( $\dot{X}_{PIA}$ ). این مقدار نفوذ با حل انجام شده برای تعیین سرعت و طول پرتابه در قسمت برخورد با سرامیک با مدل اصلاح‌شده فلوز،

مساحت مقطع این سطح در جدول ۲ برای هر ۷ حالت نشان داده شده است. بنابراین سرعت پرتابه در لحظه برخورد با سرامیک بدون تغییر برای این بخش از پرتابه، به فلز پشتیبان رسیده است. با این فرض و داشتن مسافت پیموده شده و سرعت برخورد، مدت زمان لازم برای رسیدن پرتابه به سطح فلز پشتیبان به‌دست می‌آید. با حل رابطه (۴۵)، مقدار این زمان به‌دست آمده است.

$$C_t = \dot{X}_P t \quad (45)$$

جدول ۲) مساحت سطح مقطع پرتابه در تماس و بدون تماس با سرامیک

شماره	سطح مقطع برخورد پرتابه در تماس با سرامیک $A_{PIA}$ (mm <sup>2</sup> )	سطح مقطع برخورد پرتابه بدون تماس با سرامیک $A_{PNIA}$ (mm <sup>2</sup> )	شعاع معادل برای سطح مقطع برخورد پرتابه با سرامیک a (mm)
۱	$\pi(PR)^2$	0	(PR)
۲	$\frac{23}{24}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{24}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{23}{24}}(PR)$
۳	$\frac{15}{16}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{16}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{15}{16}}(PR)$
۴	$\frac{7}{8}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{8}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{7}{8}}(PR)$
۵	$\frac{5}{6}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{6}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{5}{6}}(PR)$
۶	$\frac{13}{16}\pi(PR)^2$	$\frac{3}{16}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{13}{16}}(PR)$
۷	$\frac{3}{4}\pi(PR)^2$	$\frac{1}{4}\pi(PR)^2$	$\sqrt{\frac{3}{4}}(PR)$

### ۲-۲-۳- برخورد پرتابه در تماس با سرامیک

در این بخش با داشتن سطح مقطع پرتابه در تماس با سرامیک، این سطح معادل با یک سطح مقطع دایره در نظر گرفته شده است. مساحت‌های سطح مقطع پرتابه در تماس با سرامیک و سطح معادل در جدول ۲ آورده شده است. طول پرتابه بعد از برخورد در هر دو قسمت، با طول اولیه پرتابه یکسان است. بنابراین ابعاد پرتابه جدید به همان شکل استوانه‌ای سر تخت، قابل محاسبه است. با مشخص شدن ابعاد پرتابه جدید و شرایط سرامیکی که در محل برخورد پرتابه، بدون سوراخ است، سرعت، طول و عمق نفوذ در فلز پشتیبان در لحظه سایش کامل سرامیک از روابط اصلاح شده فلوز قابل محاسبه است.

### ۲-۲-۴- زاویه تمایل پرتابه

مهم‌ترین بخش از برخورد پرتابه در اهداف سوراخ‌دار، محاسبه زاویه تمایل پرتابه بعد از برخورد به سوراخ است. در لحظه رسیدن هر دو قسمت پرتابه به فلز پشتیبان، زمان رسیدن پرتابه در برخورد بدون تماس با سرامیک و سرعت پرتابه در برخورد با تماس با سرامیک مشخص است. بنابراین جابجایی پرتابه در برخورد با تماس با سرامیک قابل محاسبه است. این مقدار از رابطه (۴۶) به‌دست آمده است. بنابراین در یک زمان مشخص هر دو قسمت پرتابه با



برای محاسبه مقدار  $\delta$ ، باید عاملی که باعث این تغییر در راستای حرکت پرتابه شده است، مشخص شود. سرعت اولیه پرتابه بعد از وارد شدن کامل سطح مقطع پرتابه و تغییر راستای آن به دو مولفه تجزیه شده است. یک مولفه در راستای حرکت  $\dot{X}_{Par}$  و یک مولفه عمود بر راستای حرکت  $\dot{X}_{Per}$  است. در روابط (۵۳) و (۵۴) این دو مولفه مشخص شده است.

$$\dot{X}_{Par} = \dot{X}_{PB} \cos \delta \quad (53)$$

$$\dot{X}_{Per} = \dot{X}_{PB} \sin \delta \quad (54)$$

مولفه سرعت عمود بر مسیر حرکت باعث چرخش پرتابه و مولفه موازی مسیر حرکت باعث نفوذ پرتابه می‌شود. بعد از وارد شدن کامل سطح مقطع پرتابه، دیگر تغییر راستای پرتابه اتفاق نمی‌افتد بنابراین مولفه عمودی سرعت صفر است. به عبارت دیگر انرژی جنبشی پرتابه در اثر مولفه سرعت عمودی تبدیل به چرخش پرتابه به اندازه  $\delta$  شده است. بنابراین از مساوی قرار دادن این انرژی جنبشی با مقدار کار مصرفی در این مسیر، میزان چرخش پرتابه به دست می‌آید [15]. کار انجام شده توسط پرتابه در مسیر چرخش از رابطه (۵۵) به دست می‌آید. با توجه به کوچک بودن زاویه از یک تقریب نیز استفاده شده است.

$$X_{\delta} = [(PR) \tan(\beta + \delta)] \delta \quad (55)$$

تغییرات نیروی مقاوم جانبی نسبت به زمان به صورت خطی فرض شده است. بنابراین نیروی مقاوم جانبی متوسط وارد بر پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ از رابطه (۵۶) به دست آمده است:

$$F_{Per} = \frac{1}{2} F_0 \sin \beta \quad (56)$$

نیروی اولیه وارد بر پرتابه با استفاده از تئوری انبساط حفره دینامیکی از رابطه (۵۷) به دست آمده است.

$$F_0 = \pi(PR)^2 (AN_1 \sigma_y + BN_2 \rho (\dot{X}_{PB})^2) \quad (57)$$

مقادیر  $N_1$  و  $N_2$  برای پرتابه تخت برابر یک است [14].  $A$  و  $B$  ثابت‌های تجربی مربوط به جنس هدف،  $N_1$  و  $N_2$  ضرایب شکل مربوط به هندسه دماغه پرتابه،  $\sigma_y$  تنش تسلیم دینامیکی هدف و  $\rho$  چگالی هدف است.

حال مقدار کار انجام شده در این مسیر با انرژی جنبشی مصرف شده برابر است. از مساوی قرار دادن آنها که در رابطه (۵۸) آمده است، مقدار  $\delta$ ، طبق رابطه (۵۹) به دست آمده است.

$$F_{Per} X_{\delta} = \frac{1}{2} M_{PB} (\dot{X}_{Per})^2 \quad (58)$$

$$\sin^2 \delta = \delta (\sin \beta) \frac{\pi}{4} [\tan(\beta + \delta)] \left( \frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \quad (59)$$

با یک ساده‌سازی می‌توان رابطه (۵۹) را در فرم رابطه (۶۰) نوشت.

$$\delta = (\sin \beta) \frac{\pi}{4} [\tan(\beta)] \left( \frac{1}{I} + \frac{1}{N} \right) \quad (60)$$

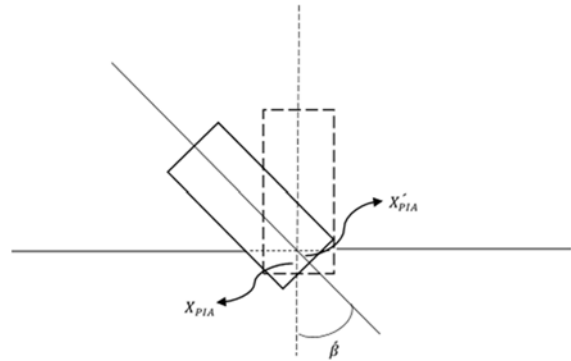
$I$  و  $N$  کمیت‌های بدون بعد به عنوان تابع برخورد و تابع هندسی که با استفاده از روابط (۶۱) و (۶۲) تعریف شده است.

$$I = \frac{\lambda \phi_f}{AN_1} \quad (61)$$

$$N = \frac{\lambda}{BN_2} \quad (62)$$

$\phi_f$  عدد تخریب جانسون که از رابطه (۶۳) و  $\lambda$  جرم بی‌بعد شده پرتابه که از رابطه (۶۴) به دست آمده است.

تعیین خواهد شد. بنابراین، قبل از شروع نفوذ مایل پرتابه به داخل فلز پشتیبان، باید این نفوذ در راستای جدید حرکت پرتابه محاسبه شود. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این مقدار از رابطه (۵۲) در راستای حرکت جدید پرتابه به دست آمده است.



شکل ۷) نفوذ اولیه در پشتیبان هنگام فرسایش سرامیک

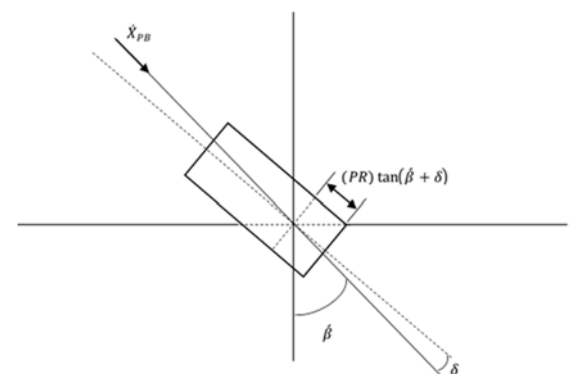
$$X'_{PIA} = \frac{X_{PIA}}{\cos \beta} \quad (52)$$

### ۲-۲-۲- نفوذ مایل در فلز پشتیبان

به منظور بررسی حرکت مایل پرتابه در پشتیبان فلزی و مشخصات پرتابه که در مراحل قبل تعیین شده است، سه مرحله برای نفوذ مایل پرتابه در پشتیبان در نظر گرفته شده است. مرحله اول تغییر راستای پرتابه از مسیر اولیه با توجه به نیروهایی که بر پرتابه وارد می‌شوند، است. مرحله دوم نفوذ پرتابه با مولفه موازی سرعت در راستای نفوذ و به صورت مستقیم در داخل فلز پشتیبان است. مرحله سوم معادل‌سازی حرکت پرتابه به داخل فلز پشتیبان با توجه به زاویه تمایل حرکت آن و مشخص نمودن عمق نفوذ نهایی در داخل هدف است.

### ۲-۲-۲- محاسبه تغییر راستای پرتابه

بعد از وارد شدن پرتابه در فلز پشتیبان با توجه به عدم تقارن در نیروهای وارد بر آن، مقداری از راستای اولیه خود منحرف می‌شود. فرض بر این است که تغییر راستا تا زمانی که سطح مقطع پرتابه به صورت کامل وارد فلز پشتیبان شود، ادامه دارد. در شکل ۸ این تغییر راستا نشان داده شده است.



شکل ۸) تغییر راستای پرتابه در هنگام ورود به فلز پشتیبان

در شکل ۱۰ آمده است.

اطراف هدف کاملاً بدون حرکت و پرتابه با آزادی حرکت در تمامی جهات در نظر گرفته شده است. در نمودار ۱ تغییر اندازه مش بر روی عمق نفوذ در سرعت ۱۳۵۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. بنابراین اندازه دانه‌بندی به صورت ۰/۳۵ در جهت ضخامت برای مدل در نظر گرفته شده است.

$$\phi_j = \frac{\rho(X_{PB})^2}{\sigma_y} \quad (63)$$

$$\lambda = \frac{M_{PB}}{\rho(PD)^3} \quad (64)$$

بدین ترتیب مقدار انحراف پرتابه از راستای اولیه نفوذ محاسبه می‌شود. این زاویه به عواملی از جمله شکل پرتابه، سرعت برخورد، جنس هدف، جرم پرتابه و غیره وابسته است.

### ۲-۸-۶-۲ نفوذ پرتابه با مولفه موازی سرعت در فلز پشتیبان

با مشخص شدن مقدار انحراف پرتابه در بخش قبل، مولفه موازی مسیری حرکت نیز تعیین می‌شود. این مولفه سرعت، عامل نفوذ پرتابه به داخل فلز پشتیبان است. با داشتن سرعت پرتابه و سایر مشخصات آن از جمله سطح مقطع، جرم و طول، از طریق مدل فلوز اصلاح شده، مقدار عمق نفوذ مستقیم به دست می‌آید.

### ۲-۹-۲-۲ تبدیل عمق نفوذ عمودی به عمق نفوذ مایل

عمق نفوذ به دست آمده از مدل فلوز اصلاح شده، برای نفوذ مستقیم پرتابه در داخل فلز پشتیبان است. با توجه به برخورد مایل پرتابه، عمق نفوذ مایل از رابطه (۶۵) به دست می‌آید. بنابراین عمق نفوذ نهایی طبق رابطه (۶۷) از جمع مقادیر عمق نفوذ اولیه در راستای جدید که از رابطه (۶۶) و عمق نفوذ مایل به دست خواهد آمد.

$$X_{NP} = X_{OP} \cos(\beta + \delta) \quad (65)$$

$$X_{PIA}'' = \frac{X_{PIA}}{\cos(\beta + \delta)} \quad (66)$$

$$X_{PEN} = X_{PIA}'' + X_{OP} \quad (67)$$

### ۲-۱۰-۲-۲ نمودار محاسبه عمق نفوذ

به منظور بررسی بهتر مدل تحلیلی و استفاده از آن در برنامه‌های کامپیوتری، نمودار این مدل در شکل ۹ آمده است.

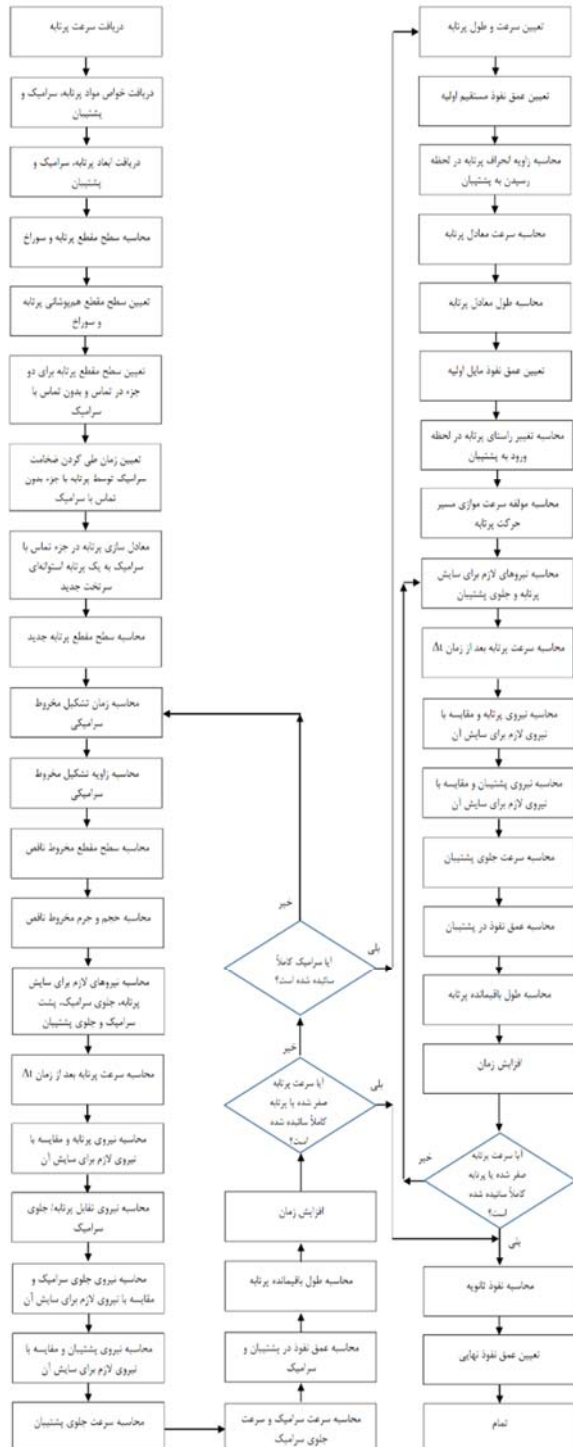
پرتابه به شکل استوانه سر تخت و هدف نیز به صورت دایره‌ای آلومینیوم/سرامیک با یک سوراخ دایره‌ای با قطر کوچک‌تر از قطر پرتابه در وسط آن است. شرایط ظاهری پرتابه و هدف مورد تحلیل، در شکل ۴ آمده است. سایر شرایط مورد نیاز به عنوان ورودی از کاربر گرفته خواهد شد.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی با توجه به رفتار متفاوت لایه‌های هدف یک فرآیند پیچیده مکانیکی است. با توجه به مدل‌سازی تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سوراخ‌دار و بدون سوراخ در بخش‌های قبل، به منظور مقایسه نتایج نفوذ پرتابه در اهداف سوراخ‌دار و عدم وجود نتایج تجربی در این زمینه، از شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی از نتایج آزمایش‌های تجربی بلس و همکاران [7] در مورد نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی بدون سوراخ، استفاده شده است.

### ۳-۲-۳ هندسه، شرایط مرزی و حساسیت به مش

هندسه و شرایط مرزی براساس آزمایش‌های تجربی بلس و همکاران [7] تعیین شده است. این هندسه و جنس پرتابه و هدف



شکل ۹ نمودار محاسبه عمق نفوذ در مدل تحلیلی جدید برای اهداف ترکیبی سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت سرامیک/فلز

به‌منظور حذف المان‌ها در پرتابه و پشتیبان از مدل گسیختگی جانسون- کوک استفاده شده است. معادله مربوط به این در رابطه (۶۹) آمده است.

$$\varepsilon_{pl}^D = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}} \right) \right] [1 + D_5 \hat{\theta}] \quad (69)$$

$\varepsilon_{pl}^D$  کرنش مربوط به شروع تخریب،  $D_1$  تا  $D_5$  ضرایب ثابت مربوط به آزمایش،  $\eta$  نسبت سه محوره بودن تنش،  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک،  $\dot{\varepsilon}$  نرخ کرنش مربوط به اندازه‌گیری ثابت‌های آزمایش و دمای فلز است. در جدول ۳ و  $\varepsilon$ ، مقادیر معادله جانسون- کوک، ثابت‌های خواص مواد و ثابت‌های پارگی جانسون- کوک وارد شده در نرم‌افزار برای پرتابه و فلز پشتیبان، آورده شده است.

برای مدل‌سازی رفتار سرامیک از معادله دراکر- پراگر استفاده شده است. فرم نمایی کلی این معادله به‌صورت رابطه (۷۰) است:

$$\sigma = \frac{1}{a^{1/b}} (P + P_t)^{1/b} \quad (70)$$

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

برای توصیف رفتار هیدرودینامیک سرامیک از معادله حالت مای-گرونینژن استفاده شده است. فرم کلی این معادله که نسبت به انرژی خطی است به‌صورت رابطه (۷۱) است:

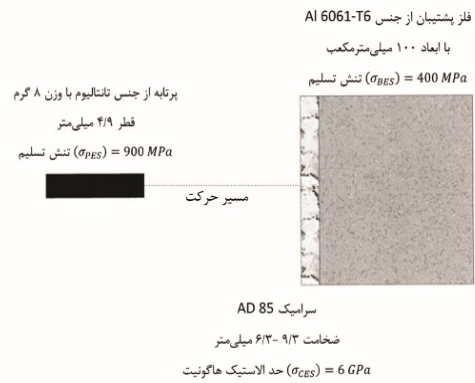
$$P - P_H = \Gamma \rho (E_m - E_H) \quad (71)$$

$P_H$  و  $E_H$  به‌ترتیب فشار و انرژی هاگنویت بر واحد جرم بوده که تنها تابعی از دانسیته هستند.  $\Gamma$ ، نسبت گرونینژن نام 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 (۷۲) آمده است:

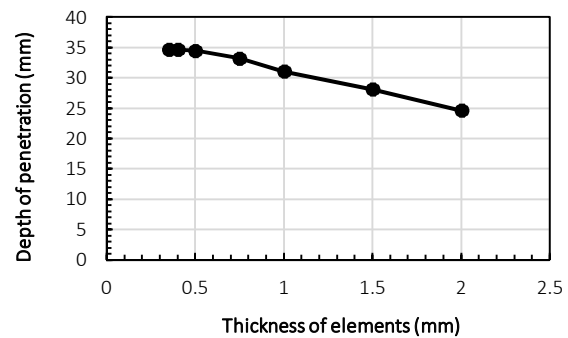
$$P = P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2}, \quad \eta = 1 - \rho_0 / \rho \quad (72)$$

**جدول ۳** پارامترهای مدل و معیار گسیختگی جانسون- کوک مربوط به ماده تانتالیوم<sup>[28]</sup>

پارامتر	نماد(واحد)	مقدار
چگالی	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۶۶۵۰
شدت تنش	$\sigma_{PEs}$ (MPa)	۹۰۰
مدول برشی	$G$ (GPa)	۶۹
مدول یانگ (الاستیسیته)	$E$ (GPa)	۱۸۶
ضریب پواسون	$\nu$	۰/۳۵
تنش تسلیم اولیه	$A$ (MPa)	۶۸۴/۵
ثابت سختی	$B$ (MPa)	۲۰۵/۳
ثابت نرخ کرنش	$C$	۰/۱
توان نرمی گرمایی	$m$	۰/۴۲۵
توان سختی	$n$	۰/۷۸
نرخ کرنش مرجع	$\dot{\varepsilon}_0$ (S <sup>-1</sup> )	۳۵۰۰
پارامتر شکست اول	$d_1$	۰/۷
پارامتر شکست دوم	$d_2$	۰/۳۲
پارامتر شکست سوم	$d_3$	-۱/۵
پارامتر شکست چهارم	$d_4$	۰
پارامتر شکست پنجم	$d_5$	۰



شکل ۱۰) شرایط پرتابه و هدف در آزمایش‌های بلس [۷]



نمودار ۱) بررسی همگرایی جواب‌ها در مدل عددی با تغییر ضخامت المان‌ها و اندازه‌گیری عمق نفوذ در پشتیبان فلزی

### ۲-۳- مدل‌سازی رفتار پرتابه و هدف

رفتار پرتابه و هدف به‌صورت تغییر شکل‌پذیر مدل شده است. رفتار پرتابه با در نظر گرفتن تغییرات موضعی در محل برخورد با هدف، دچار سایش، تغییر شکل و در ادامه به‌صورت صلب است. سرامیک و پشتیبان نیز با در نظر گرفتن تغییرات موضعی در زمان رسیدن پرتابه به آنها و اثرات متقابل روی یکدیگر در اثر ضربه پرتابه دچار سایش و تغییر شکل می‌شوند. بنابراین در این مدل‌سازی از معادله جانسون- کوک برای مدل‌کردن رفتار پرتابه و پشتیبان فلزی و معادله پلاستیسیته دراکر- پراگر و معادله حالت مای-گرونینژن 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. مدل جانسون- کوک برای پرتابه و پشتیبان از رابطه (۶۸) به‌دست می‌آید<sup>[26, 27]</sup>.

$$\sigma^{pl} = [A + B(\sigma^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - \hat{\theta}^m] \quad (68)$$

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

در این رابطه  $\theta$  دمای فلز،  $\theta_{melt}$  دمای ذوب فلز و  $\theta_{Tran}$  دمایی است که دماهای کمتر از آن تأثیری بر تنش سیلان فلز نخواهد داشت.  $\dot{\varepsilon}_0$  نرخ کرنشی است که مقادیر  $A$ ،  $B$  و  $n$  در آن نرخ، اندازه‌گیری می‌شوند.  $C$  و  $m$  نیز ثابت‌های آزمایش هستند.

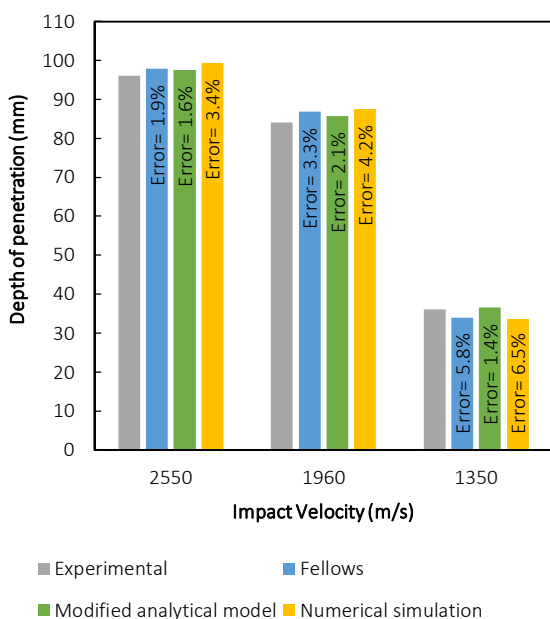
کاملاً مقید شده است. در نمودار ۲ این نتایج با هم مقایسه شده است.

جدول ۵) پارامترهای معادله دراگر- پراگر و معادله حالت مای- گرونیزن برای سرامیک آلومینا ۸۵ %

a	b	$\sigma_c$ (MPa)	s	$c_0$ (m/s)
$1/2 \times 10^{-2}$	۱/۵۶۲۵	۵۴۴۱/۱۵	۰/۵	۶۳۵۲/۲۳۴۰۳۲

جدول ۶) پارامترهای مدل جانسون- هالمکوئیست JH-2 مربوط به ماده آلومینا (سرامیک) ۸۵% [30]

پارامتر	نماد (واحد)	مقدار
چگالی	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	۳۴۲۰
مدول برشی	G(GPa)	۹۰
مقاومت اولیه نرمال	A	۰/۸۸
مقاومت شکست نرمال	B	۰/۲۸
ثابت نرخ کرنش	C	۰
توان مقاومت شکست	M	۰/۶
توان مقاومت اولیه	N	۰/۶۴
نرخ کرنش مرجع	$\dot{\epsilon}_0$	۱
حداکثر مقاومت کششی	T(GPa)	۰/۱۵۵
حداکثر مقاومت شکست نرمال	$\sigma_i^{max}$ (GPa)	۰/۵
حداکثر کرنش مؤثر پلاستیک	$\epsilon_{f,max}^{-pl}$	۱
حداقل کرنش مؤثر پلاستیک	$\epsilon_{f,min}^{-pl}$	۰
حد کشسان هیوگونیت	HEL (GPa)	۶
فشار در حد کشسان هیوگونیت	$P_{HEL}$ (GPa)	۱/۹۳
کسر تبدیل انرژی (ضریب بال کینگ)	$\beta$	۱
پارامتر کرنش پلاستیک در شکست	$D_1$	۰/۰۵
توان کرنش پلاستیک در شکست	$D_2$	۱
مدول بالک	$K_1$ (GPa)	۱۳۸
ضریب فشار دوم	$K_2$ (GPa)	۰
ضریب فشار سوم	$K_3$ (GPa)	۰
معیار شکست	FS	۱/۵



نمودار ۲) مقایسه نتایج تحلیلی، تجربی و عددی

جدول ۴) پارامترهای مدل و معیار گسیختگی جانسون- کوک مربوط به ماده AL6061-T6 [29]

پارامتر	نماد (واحد)	مقدار
چگالی	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۰۰
شدت تنش	$\sigma_{BES}$ (MPa)	۴۰۰
سرعت صوت	(M/S)	۵۳۰۰
ضریب آنتروپی	S	۱/۳۸
مدول برشی	G(GPa)	۲۶
مدول یانگ	E(GPa)	۶۸
ضریب پواسون	$\nu$	۰/۳۳
تنش تسلیم اولیه	A(MPa)	۳۲۴
ثابت سختی	B(MPa)	۱۱۴
ثابت نرخ کرنش	C	۰/۰۰۲
توان نرمی گرمایی	m	۱/۳۴
توان سختی	n	۰/۴۲
نرخ کرنش مرجع	$\dot{\epsilon}_0$ (S <sup>-1</sup> )	۱
پارامتر شکست اول	$d_1$	۰/۷۷
پارامتر شکست دوم	$d_2$	۱/۴۵
پارامتر شکست سوم	$d_3$	۰/۴۷
پارامتر شکست چهارم	$d_4$	۰
پارامتر شکست پنجم	$d_5$	۱/۶

$\rho_0$  چگالی،  $C_0$  و S پارامترهای ثابت ماده هستند. پارامترهای ماده مربوط به مدل پلاستیسیته دراگر- پراگر و معادله حالت مای- گرونیزن برای آلومینا در جدول ۵ آمده است. با داشتن ثابت‌های معادله جانسون- هالمکوئیست از مرجع [30] و جایگذاری در روابط (۷۳) تا (۷۷)، اعداد جدول ۶ به دست آمده است:

$$a = \frac{P_{HEL}}{(A \times \sigma_{HEL})^{\frac{1}{N}}} \quad (73)$$

$$b = \frac{1}{N} \quad (74)$$

$$T = a \sigma_c^b - \frac{\sigma_c}{3} \quad (75)$$

$$K_1 = \rho_0 c_0^2 \quad (76)$$

$$K_2 = \rho_0 c_0^2 (2s - 1) \quad (77)$$

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

### ۳-۳- صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی

به‌منظور بررسی اعتبار مدل عددی از نتایج آزمایش‌های بس و همکاران استفاده شده است. شرایط پرتابه و هدف در شکل ۱۰ آمده 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 ۳۵٪ 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. حرکت پرتابه بدون محدودیت بوده و چهار طرف هدف به‌علت عدم حرکت

هدف و ابعاد آنها در شکل ۵ نشان داده شده است. خواص پرتابه و فلز پشتیبان معادله جانسون- کوک و گسیختگی جانسون- کوک در جدول های ۷ و ۸ آمده است. خواص سرامیک نیز در جدول ۹ آمده است.

### ۳-۴- توسعه شبیه سازی عددی

در این بخش با توجه به تعیین اعتبار مدل سازی عددی، شبیه سازی مربوط به مدل تحلیلی برای اهداف سوراخدار انجام شده است. مدل سازی رفتار پرتابه و هدف، شرایط مرزی و بررسی حساسیت به مش در بخش قبلی بیان شده است. هندسه پرتابه و

جدول ۷) ثابت های معادله جانسون- کوک برای پشتیبان و پرتابه [31]

جنس	A (MPa)	B (MPa)	n	c	m	$\epsilon_0$	$T_{trans} (O_c)$
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 ۸) ثابت های پارگی معادله جانسون- کوک برای پشتیبان و پرتابه [29]

جنس	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
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	۰/۷۱

جدول ۹) پارامترهای معادله دراکر- پراگر و معادله حالت مای- گرونیزن برای سرامیک آلومینا ۹۹/۵%

a	b	$\sigma_c$ (MPa)	s	$c_0$ (m/s)	$\rho_0$ (Kg/m <sup>3</sup> )	G (GPa)	$\Gamma_0$	$E_F$
۰/۲۴۹۴	۲/۶۶	۵۱۶۵/۴۷	۰/۵	۷۲۵۴/۷۶	۳۸۰۰	۱۳۵	۰	۰

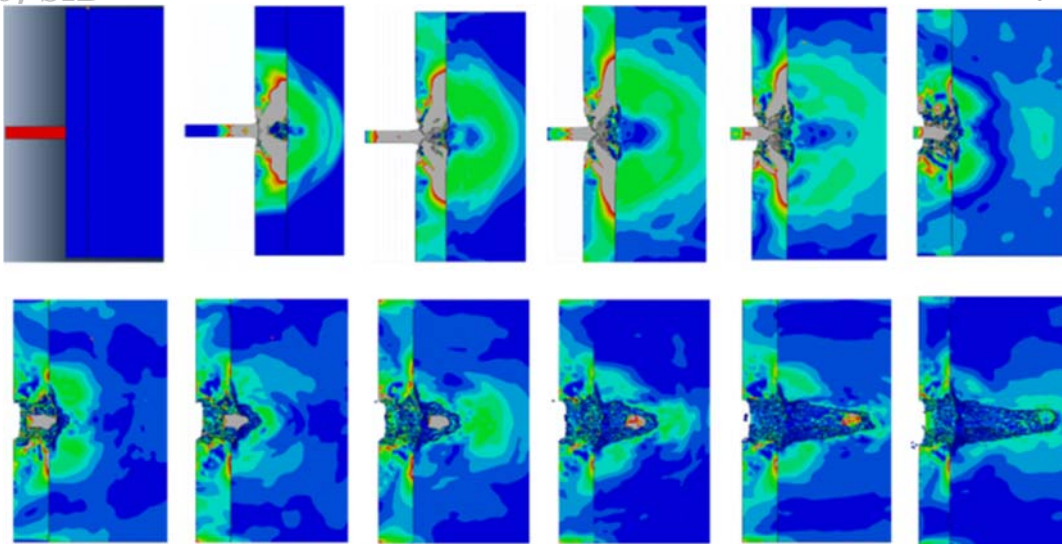
هدف برای سرعت ۳۵۰ متر بر ثانیه در زمان ۱۵۰ میکروثانیه نشان داده شده است. با توجه به اعتبار سنجی شبیه سازی عددی، مدل تحلیلی جدید با آن مقایسه شده است. این مقایسه برای حالت های ۱، ۴ و ۷ در نمودارهای ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، مدل تحلیلی جدید، پیش بینی قابل قبولی از عمق نفوذ را نشان می دهد. مراحل نفوذ پرتابه فولادی در اهداف ترکیبی نیمه بی نهایت سوراخدار سرامیک/فلز در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

### ۴- بررسی نتایج و بحث

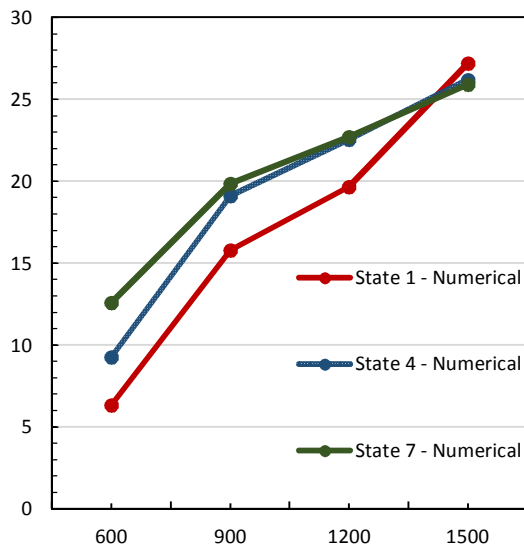
مقدار عمق نفوذ از آزمایش تجربی، مدل تحلیلی فلوز، مدل تحلیلی وودوارد، مدل اصلاحی و شبیه سازی عددی در جدول ۱۰ آمده است. مدل اصلاحی ضمن بهبود نتایج مدل تحلیلی فلوز در سرعت های بالا و پایین، نقص این مدل را نیز برطرف کرده است. مدل فلوز در سرعت های امکان پیش بینی عمق نفوذ را نداشته است اما مدل اصلاحی این کار را به خوبی انجام داده است. شبیه سازی عددی نیز در مقایسه با نتایج تجربی، اندازه گیری مناسبی از مقدار عمق نفوذ داشته است. در شکل ۱۱ شبیه سازی عددی، مراحل نفوذ پرتابه در

جدول ۱۰) مقایسه عمق نفوذ بین نتایج مدل اصلاحی و شبیه سازی عددی با مدل فلوز [11]، مدل وودوارد [8] و نتایج تجربی آزمایش های بسس و همکاران [7]

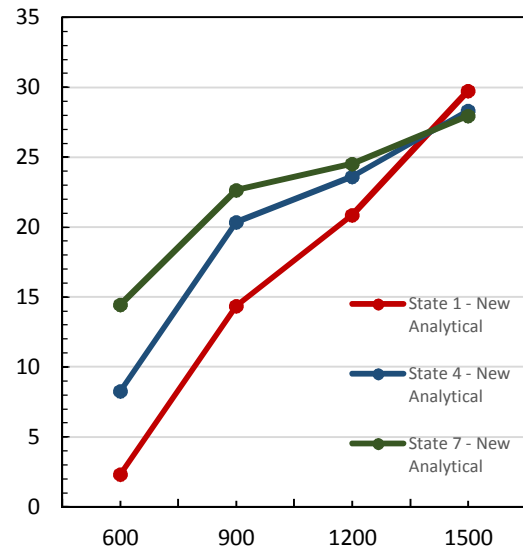
شماره	نوع پرتابه	سرعت پرتابه (متر بر ثانیه)	اندازه گیری تجربی نفوذ در پشتیبان (میلی متر)	ضخامت سرامیک (میلی متر)	پیش بینی مدل فلوز از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی متر)	پیش بینی مدل وودوارد از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی متر)	پیش بینی مدل جدید از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی متر)	پیش بینی شبیه سازی عددی از عمق نفوذ در پشتیبان (میلی متر)
۱	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۲۵۰۰	۹۶	۹/۳	۹۷/۸۲۹	۶۵	۹۷/۵۴۰	۹۹/۳
۲	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۱۹۶۰	۸۴	۹/۳	۸۶/۸۴۸	۴۶	۸۵/۷۹۸	۸۷/۶
۳	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۱۳۵۰	۳۶	۹/۳	۳۳/۸۸۸	۳۳	۳۶/۵۳۴	۳۳/۶۵
۴	۷/۶ گرم تانتالیوم میله بلند نوک تیز	۷۰۰	۵/۳	۹/۱۹	۰	۰	۶/۵۶۵	-
۵	۸ گرم تانتالیوم میله بلند	۶۱۰	۴/۸	۶/۳	۰	۰	۵/۱۴۵	۳/۲



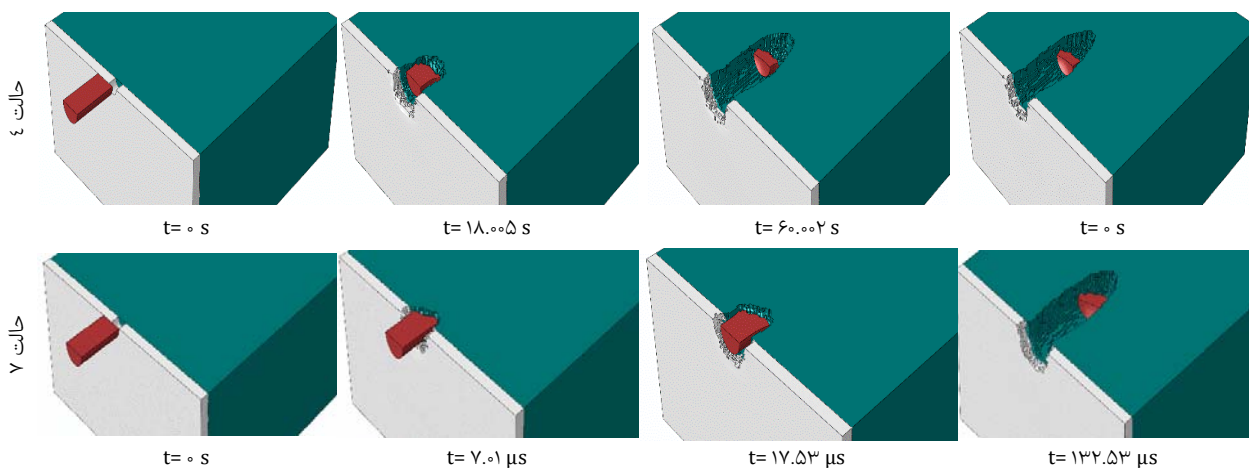
شکل (۱۱) مراحل نفوذ پرتابه در هدف ترکیبی نیمه بی‌نهایت سرامیک/فلز با سرعت برخورد ۱۳۵۰ متر بر ثانیه



نمودار (۱۲) مقایسه عمق نفوذ شبیه‌سازی عددی در حالت‌های ۱، ۴ و ۷ در سرعت‌های مختلف



نمودار (۱۳) مقایسه عمق نفوذ مدل تحلیلی جدید در حالت‌های ۱، ۴ و ۷ در سرعت‌های مختلف



شکل (۱۴) مراحل نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی برای حالت‌های ۴ و ۷ با سرعت ۱۵۰۰ متر بر ثانیه

این تغییر، در افزایش دقت نتایج خروجی مدل اصلاحی و نزدیکی آن به نتایج تجربی زیاد بوده است.

- به‌منظور افزایش دقت مدل تحلیلی باید بازه‌های زمانی مربوط به تحلیل، خیلی کوچک انتخاب شوند. این کوچک انتخاب کردن، مقدار خطاهای مربوط به مدل‌های خطی در نظر گرفته‌شده در هر بخش را کاهش می‌دهد.

- در زمینه نفوذ پرتابه در اهداف سوراخ تاکنون مدل تحلیلی ارایه نشده است. مدل ارایه شده در این مقاله ضمن جدیدبودن، نوآوری کامل در زمینه نفوذ پرتابه در اهداف سوراخدار است.

- مدل اصلاحی ضمن بهبود نتایج مدل فلوز با نتایج شبیه‌سازی عددی نیز مطابقت خیلی خوبی دارد.

- مدل تحلیلی جدید به‌علت نداشتن نتایج تجربی و تحلیلی سایر نویسندگان، با نتایج عددی به‌دست آمده مقایسه شده است که مطابقت خیلی خوبی باهم دارند.

- در مدل تحلیلی جدید برای اهداف ترکیبی سوراخدار، براساس هم‌پوشانی پرتابه با سوراخ یک تابع وزنی تعریف شده است.

- با استفاده از تابع وزنی تاثیر مقدار هم‌پوشانی پرتابه و سوراخ در همه متغیرها از جمله سرعت پرتابه، تغییر طول پرتابه، تغییر سطح مقطع پرتابه و غیره در نظر گرفته شده است.

- در سرعت‌های پایین ایجاد سوراخ بر روی هدف نتیجه مطلوبی ندارد. با افزایش سرعت و کم‌شدن مقاومت سرامیک در مقابل برخورد پرتابه، تاثیر سوراخ بر روی کاهش عمق نفوذ بیشتر دیده شده است.

- در همه سرعت‌های برخورد پرتابه به هدف، در صورت داشتن هم‌پوشانی پرتابه با سوراخ، زاویه تمایل ایجاد خواهد شد.

- افزایش سرعت موجب کاهش زاویه تمایل می‌شود و این به‌علت کاهش مقاومت سرامیک در برابر پرتابه است.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان و صحت نتایج آن نیز بر عهده آنها است.

**تعارض منافع:** این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

**سهم نویسندگان:** مصطفی سیاح‌بادخور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ خداداد واحدی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ علیرضا نداف‌اسکوئی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

#### ۸- فهرست علائم

$A_0$	سطح مقطع پرتابه، $m^2$
$A_1$	سطح مقطع قسمت پشت مخروط سرامیکی در تماس با پشتیبان، $m^2$
$t_c$	ضخامت سرامیک، m
x	فرسایش سرامیک، m
$\Delta t$	بازه زمانی، s
$t_{conoid}$	زمان تشکیل مخروط سرامیکی، s

نفوذ پرتابه در اهداف سوراخدار به‌منظور کاهش اثرات بالستیکی پرتابه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک/فلز به‌صورت عددی و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول مدل تحلیلی فلوز برای اهداف ترکیبی نیمه‌بی‌نهایت سرامیک/فلز مورد اصلاح قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این اصلاح نیز با نتایج تجربی و تحلیلی سایر نویسندگان و شبیه‌سازی عددی انجام شده مورد مقایسه قرار گرفت. در مرحله دوم یک مدل تحلیلی جدید برای نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی نیمه‌بی‌نهایت سوراخدار سرامیک/فلز بیان شد. نتایج این مدل نیز با شبیه‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار آباکوس مقایسه شد. نتایج زیر از این پژوهش به‌دست آمده است:

- زمان حل یک مدل تحلیلی در برنامه شده برای کامپیوتری تقریباً اذقیقه است. در حالی که برای حل مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس با توجه به اندازه مش تقریباً ۱۵ ساعت است. اختلاف زمانی بین این دو حل بسیار زیاد است.

- مدل اصلاحی مقادیر عمق نفوذ را در سرعت‌های بالا و پایین در مقایسه با نتایج تجربی با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند و نقص اساسی مدل فلوز را که مربوط به پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های پایین است، به‌خوبی پوشش داده است.

- در سرعت‌های بالاتر از ۱۳۵۰ متربرثانیه می‌توان از مدل فلوز و در سرعت‌های کمتر، از مدل تحلیلی اصلاحی جدید استفاده کرد. در صورت نیاز به‌دقت بالاتر در پیش‌بینی عمق نفوذ می‌توان در تمام سرعت‌ها از مدل تحلیلی اصلاحی استفاده نمود.

- اگرچه در مدل تحلیلی فلوز تغییرات پرتابه، سرامیک و پشتیبان به‌صورت کامل در نظر گرفته شده است اما، ابهاماتی در مسیر تعیین مقدار عمق نفوذ وجود دارد که نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این موارد در مدل اصلاحی در کنار اصلاحات انجام‌شده، برطرف شده است.

- فلوز در هر بازه زمانی از یک سرعت پرتابه مشخص استفاده کرده است. با کوچک‌نمودن بازه‌های زمانی، تغییرات سرعت پرتابه، کم خواهد شد اما، همین مقدار کم نیز در تعیین عمق نفوذ نهایی تاثیرگذار است، بنابراین در مدل اصلاحی جدید، تغییرات سرعت پرتابه، در هر بازه زمانی در نظر گرفته‌شده و در حل و تعیین عمق نفوذ در همان مرحله نیز استفاده می‌شود.

- زمان تشکیل مخروط سرامیکی برای تعیین بازه‌های زمانی حل و همچنین محاسبه جرم مخروط سرامیکی لازم است. در مدل فلوز این زمان به‌صورت جداگانه محاسبه و در نظر گرفته شده است. در مدل تحلیلی اصلاحی با محاسبه این زمان از خطای پیش‌آمده مربوط به جرم مخروط سرامیکی جلوگیری شده است.

- طول پرتابه بعد از هر بازه زمانی با توجه به شرایط برخورد در آن بازه، کاهش پیدا می‌کند. در مدل اصلاحی، تغییرات سرعت پرتابه و سرامیک در هر بازه زمانی در نظر گرفته شده و با استفاده از یک مدل خطی به محاسبه طول باقیمانده پرتابه پرداخته است. تاثیر

$A_{PNIA}$	سطح مقطع برخورد پرتابه بدون تماس با سرامیک، $m^2$
$t$	زمان طی کردن ضخامت سرامیک با سرعت ثابت، s
$\dot{X}_{PIB}$	سرعت پرتابه در جلوی پشتیبان برای قسمت با سرامیک در اهداف سوراخ‌دار، m/s
PD	قطر پرتابه، m
$X_1$	مسافت طی شده در زمان t با سرعت $\dot{X}_{PIB}$ ، m/s
$X_2$	مسافت باقی‌مانده تا رسیدن پرتابه به سطح پشتیبان، m
$\dot{X}_{PB}$	سرعت پرتابه در جلوی پشتیبان برای اهداف سوراخ‌دار، m/s
$L_{PB}$	طول پرتابه در جلوی پشتیبان برای اهداف سوراخ‌دار، m
$L_{PIE}$	طول پرتابه سائیده شده برای قسمت با سرامیک در اهداف سوراخ‌دار، m
$L_{PNI}$	طول پرتابه برای قسمت بدون سرامیک در اهداف سوراخ‌دار، m
$L_{PI}$	طول پرتابه برای قسمت با سرامیک در اهداف سوراخ‌دار، m
$A_{PB}$	سطح مقطع پرتابه در جلوی پشتیبان برای اهداف سوراخ‌دار، $m^2$
$X_{PIA}$	عمق نفوذ مستقیم به داخل فلز برای قسمت با سرامیک در اهداف سوراخ‌دار، m
$\dot{X}'_{PIA}$	عمق نفوذ مایل به داخل فلز برای قسمت با سرامیک در اهداف سوراخ‌دار، m
$\dot{X}_{Per}$	سرعت عمود بر مسیر نفوذ، m/s
$\dot{X}_{Par}$	سرعت موازی بر مسیر نفوذ، m/s
$M_{PB}$	جرم پرتابه در جلوی پشتیبان برای اهداف سوراخ‌دار، kg
$X_\delta$	جابجایی پرتابه در جهت عمود بر مسیر حرکت به اندازه کمان $\delta$ ، m
$F_{Per}$	نیروی مقاوم جانبی متوسط وارد بر پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ، N
$F_0$	نیروی اولیه وارد بر پرتابه، N
$X_{OP}$	عمق مایل نفوذ به داخل هدف، m
$X_{NP}$	عمق عمودی نفوذ به داخل هدف، m
$X''_{PIA}$	عمق مایل نفوذ به داخل هدف برای قسمت با سرامیک، m
$X_{PEN}$	عمق نفوذ به داخل هدف، m
$\beta$	زاویه انحراف اولیه، درجه
$\delta$	زاویه انحراف ثانویه، درجه

### منابع

- 1- Florence AL, Ahrens T. Interaction of projectiles and composite armor. United States: Defense Technical Information Center; 1969.
- 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- Jonas G, Zukas JA. Mechanics of penetration: analysis and experiment. International Journal of Engineering Science. 1978;16(11):879-903.
- 5- Backman ME, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. International Journal of Engineering Science. 1978;16(1):1-99.
- 6- Ravid M, Bodner S. Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles. International Journal of Engineering Science. 1983;21(6):577-591.
- 7- Bless S, Rosenberg Z, Yoon B. Hypervelocity penetration of ceramics. International Journal of

$F_p$	نیروی وارد پرتابه، N
$F_l$	نیروی تداخلی بین پرتابه و سرامیک، N
$F_c$	نیروی وارد بر جلوی سرامیک، N
$F_{C2}$	نیروی وارد بر پشت سرامیک، N
$F_{I2}$	نیروی تداخلی بین سرامیک و پشتیبان، N
$F_B$	نیروی وارد بر پشتیبان، N
$M_p$	جرم پرتابه، Kg
$\Delta M_p$	کاهش جرم پرتابه، Kg
$M_c$	جرم مخروط سرامیکی، Kg
$\Delta M_c$	کاهش جرم قسمت جلویی مخروط سرامیکی، Kg
$\Delta M_{C2}$	کاهش جرم قسمت پشتی مخروط سرامیکی، Kg
$M_{CO}$	جرم قبلی مخروط سرامیکی، Kg
$M_B$	جرم پشتیبان، Kg
$\rho_p$	چگالی پرتابه، $Kg/m^3$
$\rho_c$	چگالی سرامیک، $Kg/m^3$
$\sigma_{PES}$	مقاومت فرسایشی پرتابه، Pa
$\sigma_{CES}$	مقاومت فرسایشی سرامیک، Pa
$\sigma_{BES}$	مقاومت فرسایشی پشتیبان، Pa
$Y_p$	مقاومت پرتابه، Pa
$R_t$	مقاومت هدف، Pa
$Y_c$	مقاومت سرامیک خردشده، Pa
$Y_{CO}$	مقاومت سرامیک سالم، Pa
$\varphi$	نیم زاویه مخروط سرامیکی، درجه
$\varphi_{new}$	نیم زاویه مخروط سرامیکی جدید، درجه
$V_c$	حجم مخروط سرامیک، $m^3$
R	قطر بزرگ مخروط ناقص سرامیکی، m
r	قطر کوچک مخروط ناقص سرامیکی، m
$\dot{X}_p$	سرعت پرتابه، m/s
$\dot{X}_c$	سرعت سرامیک، m/s
$\dot{X}_B$	سرعت پشتیبان، m/s
$\dot{X}_{CF}$	سرعت جلوی سرامیک، m/s
$\dot{X}_{CE}$	سرعت سایش سرامیک، m/s
$\dot{X}_{OC}$	سرعت قبلی سرامیک، m/s
$\dot{X}_{BF}$	سرعت جلوی پشتیبان، m/s
$\dot{X}_{BE}$	سرعت سایش پشتیبان، m/s
$\dot{X}_{P1}$	سرعت پرتابه در لحظه $t_1$ ، m/s
$\dot{X}_{P2}$	سرعت پرتابه در لحظه $t_2$ ، m/s
$\dot{X}_{CF1}$	سرعت جلوی سرامیک در لحظه $t_1$ ، m/s
$\dot{X}_{CF2}$	سرعت جلوی سرامیک در لحظه $t_2$ ، m/s
$\dot{X}_{B1}$	سرعت پشتیبان در لحظه $t_1$ ، m/s
$\dot{X}_{B2}$	سرعت پشتیبان در لحظه $t_2$ ، m/s
$\dot{X}_{BF1}$	سرعت جلوی پشتیبان در لحظه $t_1$ ، m/s
$\dot{X}_{BF2}$	سرعت جلوی پشتیبان در لحظه $t_2$ ، m/s
U	سرعت نفوذ، m/s
V	سرعت پرتابه، m/s
c	سرعت حرکت موج الاستیک در سرامیک، m/s
w	سرعت صفحه پشتیبان، m/s
$u_{phase1}$	سرعت نفوذ در پایان مرحله شکست سرامیک، m/s
$\dot{X}_p$	شتاب پرتابه، $m/s^2$
PR	شعاع پرتابه، m
PIR	شعاع برخورد پرتابه در تماس با سرامیک، m
$A_{PIA}$	سطح مقطع برخورد پرتابه در تماس با سرامیک، $m^2$
HR	شعاع سوراخ، m



- 21- Kılıç N, Bedir S, Erdik A, Ekici B, Taşdemirci A, Güden M. Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*. 2014;63:427-438.
- 22- Babaei H, Mostofi TM, 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- Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S. On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Structures*. 2017;112:118-124.
- 24- Kılıç N, Ekici B, Bedir S. Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2017;24(7):615-624.
- 25- Fras T, Faderl N. Influence of add-on perforated plates on the protective performance of light-weight armour systems. 2018;9(31):31-48. [French]
- 26- Johnson GR, Cook WH, Johnson G, Cook W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics*. Berlin: ScienceOpen Inc.; 1983. pp. 541-547.
- 27- 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.
- 28- List G, Sutter G, Arnoux JJ. Analysis of the high speed sliding interaction between titanium alloy and tantalum. *Wear*. 2013;301(1-2):663-670.
- 29- 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.
- 30- Cronin DS, Bui K, Kaufmann C, McIntosh G, Berstad T, Cronin D. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-Dyna. 4<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference. Germany: DYNAmore; 2003.
- 31- Alipour R, Najarian F. A FEM study of explosive welding of double layer tubes. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2011;5(1):183-185.
- Impact Engineering. 1987;5(1-4):165-171.
- 8- Woodward RL. A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *International Journal of Impact Engineering*. 1990;9(4):455-474.
- 9- Den Reijer PC. Impact on ceramic faced armour [Dissertation]. Delft University of Technology: TU Delft; 1991.
- 10- Zaera R, Sánchez-Gálvez V. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours. *International Journal of Impact Engineering*. 1998;21(3):133-148.
- 11- Fellows N, Barton P. Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour. *International journal of impact engineering*. 1999;22(8):793-811.
- 12- Diederer A, Broos J, Peijen M. Modern armour configurations against 14.5 mm AP. *Lightweight Armour Systems Symposium*. Shrivenham, United Kingdom: Unknown Publisher; 1999.
- 13- Chen X, Li Q. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics. *International Journal of Impact Engineering*. 2002;27(6):619-637.
- 14- Chen X, Li Q. Perforation of a thick plate by rigid projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2003;28(7):743-759.
- 15- Chen X, Li Q, Fan S. Oblique perforation of thick metallic plates by rigid projectiles. *Acta Mechanica Sinica*. 2006;22(4):367-76.
- 16- Rosenberg Z, Ashuach Y, Dekel E. More on the ricochet of eroding long rods—Validating the analytical model with 3D simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2007;34(5):942-957.
- 17- Balos S, Grabulov V, Sidjanin L, Pantic M. Wire fence as applique armour. *Materials & Design*. 2010;31(3):1293-1301.
- 18- Balos S, Grabulov V, Sidjanin L, Pantic M, Radisavljevic I. Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application. *Materials & Design*. 2010;31(6):2916-2924.
- 19- Mishra B, Ramakrishna B, Jena P, Kumar KS, Madhu V, Gupta NK. Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact. *Materials & Design*. 2013;43:17-24.
- 20- Radisavljevic I, Balos S, Nikacevic M, Sidjanin L. Optimization of geometrical characteristics of perforated plates. *Materials & Design*. 2013;49:81-89.