



## Analytical and Numerical Investigation of Ballistic Impact into Layered Targets with Analytical Modifications

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Sayah Badkhor M.<sup>1</sup> PhD,  
Agha Mola Tehrani M.<sup>1</sup> MSc,  
Mirzababaie Mostofi T.<sup>1</sup> PhD,  
Naddaf Oskouei A.<sup>\*1</sup> PhD

#### How to cite this article

Sayah Badkhor M, Agha Mola Tehrani M, Mirzababaie Mostofi T, Naddaf Oskouei A. Analytical and Numerical Investigation of Ballistic Impact into Layered Targets with Analytical Modifications. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(9):2197-2211.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Faculty of Electrical, Mechanical & Computer Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

#### \*Correspondence

Address: Faculty of Electrical, Mechanical & Computer Engineering, University of Eyvanekey, Daneshgah Street, Ayatollah Taleghani Boulevard, Eyvanekey, Iran. Postal Code: 9988835918  
Phone: +98 (23) 34521596  
Fax: +98 (23) 31432  
anadaf@eyc.ac.ir

#### Article History

Received: March 17, 2020  
Accepted: June 13, 2020  
ePublished: September 20, 2020

### ABSTRACT

In impact mechanics, layered targets are important due to their high resistance to projectiles penetration. This paper deals with the analytical and numerical analysis of the penetration of tantalum projectiles on semi-infinite ceramic-metal layered targets. In the analytical study, a new modified analytical model based on the analytical model of Fellows is presented. The modifications made to the Fellows analytical model include the changes of velocity of the projectile and ceramic, the angle and timing of the formation of the ceramic cone, the erosion of ceramic, projectile and backing. Each of these modifications alone reduces or increases the depth of penetration, and all of these modifications together improve the depth of penetration. Numerical analysis is done using Abaqus software. The behavior of projectile, ceramic, and aluminum is modeled on the actual behavior of the materials and the deformation. The projectile and backing behavior is modeled with the Johnson-Cook equations and the ceramic behavior with the Drucker-Prager plasticity equation and the state equation of Mie-Gruneisen. The results of the new correction analytical model and numerical simulation are compared with the results of other authors and experimental data. The results show very good agreement. The new modified analytical model, by removing the Fellows model defects, provides a more accurate prediction of the depth of projectile penetration in the ceramic-metal layered targets. So, the weakness of this model, which is related to the unpredictability of penetration depth at low speeds, has been remedied.

**Keywords** Analytical Model; Numerical Simulation; Layered Targets; Ceramic-Metal; Penetration Depth

### CITATION LINKS

[1] Mechanics of penetration and ... [2] Hypervelocity penetration of ... [3] Development of impact model for ceramic ... [4] Penetration analysis of a projectile in ... [5] Numerical simulation of normal and oblique ... [6] Similarity methods in engineering dynamics ... [7] Numerical and experimental analysis ... [8] Deformation, strengths and strains to failure ... [9] A modified analytical model for analysis ... [10] Non-ideal projectile impact on ... [11] Perforation of AA5083-H116 aluminium ... [12] Normal and oblique projectile impact of ... [13] A penetration model for metallic targets based ... [14] Analytical and numerical investigation ... [15] Experimental and analytical investigation into ... [16] On dimensionless numbers for predicting ... [17] Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium ... [18] Theoretical analysis of projectile-target interface ... [19] An analytical model for ballistic impacts ... [20] A unified model for dwell and penetration during ... [21] Presenting a modified theory and analytical ... [22] Evaluation of the projectile penetration models ... [23] Experimental and numerical investigation of ballistic ... [24] New analytical model presentation and numerical ... [25] A theory for the deceleration of long ... [26] Analytical modelling of normal and ... [27] A constitutive model and data for metals ... [28] Fracture characteristics of three metals ... [29] Analysis of the high speed sliding interaction ... [30] An improved computational constitutive model ... [31] Modeling and simulation of brittle armors under ... [32] A ceramic armor material ... [33] The Johnson-Holmquist ceramic model as ... [34] Interaction of cylindrical penetrators with ... [35] A simple one-dimensional approach to modelling ...

## بررسی تحلیلی و عددی ضربه بالستیک در اهداف ترکیبی به همراه اصلاحات تحلیلی

مصطفی سیاح بادخور PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

مهدی آقاملا طهرانی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

توحید میرزابابایی مستوفی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

علیرضا نداف اسکوتی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

### چکیده

در مکانیک ضربه، اهداف ترکیبی به علت بالابودن مقاومت در برابر نفوذ پرتابه‌ها، اهمیت ویژه‌ای دارند. در این مقاله به بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه‌هایی از جنس تانتالیوم در اهداف نیمه‌بی‌نهایت ترکیبی سرامیک- فلز پرداخته شده است. در بخش تحلیلی ضمن بررسی مدل تحلیلی فلوز به ارایه یک مدل تحلیلی اصلاحی جدید نیز پرداخته شده است. اصلاحات انجام شده در مدل تحلیلی فلوز شامل تغییر سرعت پرتابه و سرامیک، زاویه و زمان تشکیل مخروط سرامیکی، فرسایش سرامیک، پرتابه و پشتیبان است. هر کدام از این اصلاحات به‌تنهایی موجب کاهش یا افزایش عمق نفوذ می‌شود و انجام همه این اصلاحات با هم موجب بهبود عمق نفوذ شده است. بررسی عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. رفتار پرتابه، سرامیک و آلومینیوم براساس رفتار واقعی مواد و تغییر شکل‌پذیر مدل شده است. رفتار پرتابه و پشتیبان با معادلات جانسون- کوک و رفتار سرامیک با معادلات پلاستیسیته دراکر- پراگر و معادله حالت مای- گرونیزن مدل‌سازی شده است. نتایج مدل تحلیلی اصلاحی جدید و شبیه‌سازی عددی با نتایج تحلیلی سایر نویسندگان و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تطابق بسیار خوبی بین نتایج است. مدل تحلیلی اصلاحی جدید، با رفع نواقص مدل فلوز، پیش‌بینی دقیق‌تری از عمق نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی سرامیک- فلز دارد و ضعف این مدل را که مربوط به عدم پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های پایین است، برطرف کرده است.

**کلیدواژه‌ها:** مدل تحلیلی، شبیه‌سازی عددی، اهداف ترکیبی، سرامیک- فلز، عمق نفوذ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴

\*نویسنده مسئول: anadaf@eyc.ac.ir

### مقدمه

فرآیند نفوذ در سرامیک با توجه به استحکام بالای آن، به‌خصوص در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰ به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که مدل‌کردن تحلیلی رفتار این گونه اهداف ترکیبی بسیار پیچیده است، اکثر کارهای انجام شده به‌صورت مطالعه تجربی یا عددی بوده و مدل‌سازی تحلیلی این فرآیند به‌صورت محدود انجام شده است. در میان مدل‌های تحلیلی نیز اهداف نیمه‌بی‌نهایت، کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

ویلیکینز جزء اولین محققانی بود که متوجه شد سرامیک به‌خوبی مانند یک زره عمل می‌کند. او کشف کرد که سرامیک به‌دلیل سختی بالا ابتدا حرکت پرتابه را کند و نیروی ضربه را پخش می‌کند و بر روی سطح پشتی سرامیک تشکیل یک مخروط را می‌دهد. اکثر این کارهای اولیه به‌وسیله سرامیک‌هایی که بر روی صفحه‌های فلزی نازک نصب شده بود، انجام گرفته است. او در آزمایش خود نشان داد که عملکرد سرامیک به‌شدت تحت تأثیر مواد پشتیبان و همچنین روش نصب قرار دارد [1]. بلس و همکاران، روش جدیدی برای ارزیابی سرامیک ایجاد کردند. آنها مواد پشتیبان را به‌اندازه کافی ضخیم انتخاب نمودند، به‌طوری که می‌توان آن را به‌عنوان صفحه نیمه‌بی‌نهایت تلقی کرد. بنابراین، این ایده مانع از شکست اولیه سرامیک ناشی از تغییر شکل مواد پشتیبان شد [2]. فلوز و بارتون به ارایه یک مدل تحلیلی در رابطه بانفوذ پرتابه در اهداف نیمه‌بی‌نهایت سرامیک- فلز پرداخت و با نتایج تجربی بلس و همکاران [2] نیز مقایسه کرد [3]. شکرپه و جوادپور، شبیه‌سازی عددی از ضربه پرتابه به سپرهای سرامیک- کامپوزیت ارایه کردند. آنها در مدل خود یک هدف با ضخامت ثابت و بهینه که بر مبنای روش حل به‌دست آمده بود را مورد مطالعه قرار دادند [4]. فاووز و همکاران، ناپایداری سازه‌های توخالی تقویت شده تحت بار هیدرواستاتیک خارجی را برای کاربردهای صنایع فضایی، به روش المان محدود و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق سازه‌هایی از جنس الیاف کربن در اندازه‌ها و آرایش‌های مختلف ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت [5]. بیکر و همکاران، برخورد سرعت بالای پرتابه با سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. آنها حد بالستیک و سرعت خروجی پرتابه را به‌عنوان نتایج گزارش کردند؛ و این نتایج با کارهای تجربی سایر محققین اعتبارسنجی شد [6]. خدادادی و همکاران نفوذ در پارچه‌های کولار و عوامل موثر در عملکرد بالستیکی آنها را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیق خود، مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس را انجام دادند [7]. پالمر و همکاران نیز به بررسی تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی با روش بقای مومنتوم، پرداختند [8]. لیاقت و همکاران، نفوذ مایل پرتابه مخروطی در اهداف نازک تک‌لایه و چندلایه را تحلیل کردند [9]. همچنین مروری کلی بر تحقیقات انجام شده پیرامون برخوردهای غیرایده‌ال از جمله برخورد مایل، توسط گلد/سمیت ارایه شده است [10]. بورویک و همکاران، مطالعه‌ای عددی و تجربی در مورد پرتابه‌هایی با اندازه کوچک در برخورد با صفحه‌های آلومینیومی ضخیم ۲۰ میلی‌متری انجام دادند [11]. نی و همکاران، به بررسی نفوذ در صفحات ساندویچی با هسته هبیریدی تحت ضربه پرتابه مایل پرداختند [12]. در مطالعه‌ای تحلیلی مقاومت زره سرامیکی با آنالیز ابعادی و ارتباط با خواص آن ارایه شده است [13]. طهماسی/آبادر و همکاران نیز، به ارایه یک مدل اصلاحی برای بررسی نفوذ پرتابه در اهداف نازک پرداختند و با انجام

کردند. آنها موفق شدند برای اولین بار یک مدل کاملاً تحلیلی برای این اهداف ارایه کنند و نشان دهند که عمق نفوذ در برخورد پرتابه به این اهداف به چه صورت کاهش می‌یابد [24].

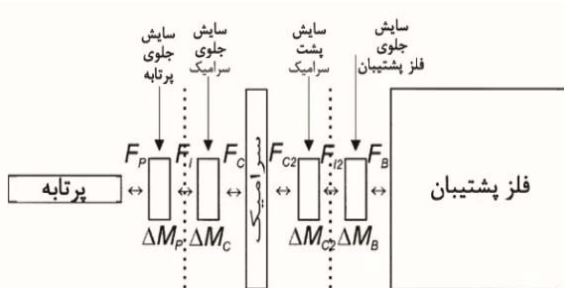
در این مقاله به بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک- فلز پرداخته شده است. با توجه به اهمیت مدل‌های تحلیلی در مکانیک نفوذ، ابتدا با بررسی کامل مدل تحلیلی فلوز به انجام اصلاحات در جهت بهبود پیش‌بینی عمق نفوذ پرداخته شده است. این اصلاحات در جهت کاهش خطاها در هر بازه زمانی از هر مرحله نفوذ پرتابه در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک- فلز است. ضمن بررسی تأثیر هر اصلاح روی عمق نفوذ نهایی، اهمیت آن نیز تعیین شده است. به منظور ارزیابی مدل اصلاحی نیز از فرآیند شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس استفاده است. بنابراین ضمن اعتبارسنجی داده‌های عددی به توسعه فرآیند شبیه‌سازی عددی نیز پرداخته شده است.

### توسعه مدل

در این بخش پیش از بیان اصلاحات انجام‌شده، مدل تحلیلی فلوز و روابط مهم آن توضیح داده شده است.

#### مدل فلوز

این مدل تحلیلی یکی از محدود مدل‌هایی است، که فرآیند نفوذ در اهداف نیمه بی‌نهایت سرامیک- فلز را به‌طور کامل بررسی کرده است. اساس کار این مدل تحلیلی بر مبنای جرم خردشده است که فرآیند نفوذ را در هر بازه زمانی، مورد ارزیابی قرار داده و نیروهای متقابل، جرم و سرعت اجزا را در هر لحظه محاسبه می‌کند. شکل ۱ مدل تحلیلی فلوز و نیروهای متقابل بین اجزای مدل و همچنین جرم فرسایش‌یافته بین آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۱) نمایش نیروهای متقابل بین پرتابه، سرامیک و پشتیبان [3]

در مدل فلوز نیروی متقابل بین پرتابه و سرامیک از رابطه ۱ به‌دست آمده است.

$$F_1 - F_C = \frac{\Delta M_C \dot{X}_{CF}}{\Delta t} \quad (1)$$

در این رابطه  $F_1$  نیروی متقابل بین پرتابه و سرامیک،  $F_C$  نیروی وارده به قسمت جلویی سرامیک،  $\Delta M_C$  جرم از دست‌رفته سطح جلویی مخروط سرامیک،  $\dot{X}_{CF}$  سرعت سرامیک در جلوی پرتابه و  $\Delta t$  تغییرات زمانی است. برای به‌دست‌آوردن  $F_1$ ، به نیروی پرتابه و نیروی سطح جلوی سرامیک و جرم‌های جداشده از آنها نیاز است. روابط ۲ تا ۶ مربوط به محاسبه این مقادیر است.

اصلاحاتی بر روی مدل وودوارد، پیش‌بینی دقیق‌تری از عمق نفوذ ارایه کردند [14]. بابایی و همکاران به بررسی تجربی و تحلیلی نفوذ پرتابه کروی صلب در صفحات با تغییر شکل‌های زیاد پرداختند [15]. میرزایابی و همکاران 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 نمودند [16]. ونکتن و همکاران به بررسی و مقایسه عملکرد بالستیکی اهداف ترکیبی سیلیکون کارباید- آلومینیوم و آلومینا- آلومینیوم به‌کمک شبیه‌سازی عددی پرداختند. آنها بررسی خود را با دو نوع پرتابه تخت و اجایو انجام دادند. آنها دریافتند که عملکرد بالستیکی اهداف سیلیکون کارباید- آلومینیوم بهتر است [17]. لی و چن به بررسی تحلیلی تقابل پرتابه و هدف پرداختند. در این بررسی، شکست و خرابی پرتابه و هدف به همراه نفوذ مایل به‌وسیله میله‌های بلند در اهداف سرامیکی مطالعه شده است. پارامترهای سرعت ضربه بحرانی در مقابل افزایش زاویه انحراف مورد بررسی قرار گرفته و تمامی پارامترهای مورد نیاز فرمول‌بندی شده است [18]. برسکیانی و همکاران به بهبود یک مدل تحلیلی برای بررسی نفوذ پرتابه تخت در اهداف سرامیکی بدون هیچ پشتوانه‌ای پرداختند. آنها پرتابه را به سه صورت فرسایشی، صلب و تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفتند. آنها با استفاده از روابط برنولی اصلاح‌شده، مشخصات پرتابه و با استفاده از تئوری هیدرودینامیک، مشخصات سرامیک را در طول برخورد تعیین نمودند. ضمناً آنها نتایج خود را با آزمایش‌های تجربی نیز مقایسه نمودند [19]. بادکار و همکاران به ارایه یک مدل تحلیلی اصلاحی برای بررسی نفوذ پرتابه‌های بلند در اهداف ضخیم سرامیکی براساس مدل والکر- اندرسون و انبساط حفره دینامیکی پرداختند. آنها نتایج خود را با داده‌های تجربی مقایسه کردند و دقت خوب مدل تحلیلی خود را نشان دادند [20]. سیاح‌بادخور و همکاران به بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه در اهداف دولایه سرامیک- آلومینیومی پرداختند. آنها با انجام اصلاحاتی نشان دادند که عمق نفوذ به نتایج تجربی نزدیک‌تر شده است [21]. در مطالعه دیگری آنها به مروری بر نفوذ پرتابه در اهداف پرداختند. ضمن بررسی مدل‌های نفوذ پرتابه در اهداف فلزی و ترکیبی سرامیک- فلز به‌دسته‌بندی این مدل‌ها پرداختند. آنها سیر تکاملی نفوذ را در روابط تحلیلی بررسی کردند و نقاط مشترک این مدل‌ها را معرفی نمودند و با توجه به اختلاف‌ها یک دسته‌بندی جامع انجام دادند [22]. سیاح‌بادخور و همکاران به بررسی تجربی و عددی شکل پرتابه روی عمق نفوذ پرداختند. آنها پرتابه‌هایی با شکل دماغه تخت، اجایو و نیم‌کره را در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار عمق نفوذ برای پرتابه با دماغه تخت بیشترین و برای پرتابه با دماغه اجایو کمترین است [23]. همچنین در پژوهش دیگری سیاح‌بادخور و همکاران به ارایه یک مدل تحلیلی جدید و بررسی عددی ضربه بالستیک در اهداف سوراخ‌دار نیمه بی‌نهایت سرامیک/فلز پرداختند و به‌منظور کاهش عمق نفوذ پرتابه از اهداف سوراخ‌دار استفاده

که در این رابطه‌ها  $F_{C2}$  نیروی سطح پشتی سرامیک و  $M_C$  جرم مخروط سرامیکی و  $A_1$  سطح مقطع سطح پشتی مخروط سرامیکی که در اثر ضربه پرتابه تشکیل شده، است. معادلات مربوط به تقابل بین ماده پشتیبان و سرامیک مشابه معادلات مربوط به تقابل پرتابه و سرامیک است و به صورت روابط ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ بیان شده است.

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

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

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

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

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

در این رابطه‌ها  $F_{I2}$  نیروی تقابل بین سرامیک و پشتیبان،  $\dot{X}_{BF}$  نیروی سطح جلوی پشتیبان،  $\Delta M_B$  کاهش جرم پشتیبان،  $\dot{X}_B$  سرعت جلوی پشتیبان،  $\Delta M_{C2}$  کاهش جرم سطح پشتی مخروط سرامیک،  $\dot{X}_B$  سرعت پشتیبان،  $\dot{X}_{BF}$  سرعت سایش ماده پشتیبان، چگالی مواد پشتیبان و  $\sigma_{BES}$  مقاومت سایشی پشتیبان است. با توجه به اینکه هدف نیمه‌بی‌نهایت است، بنابراین می‌توان سرعت پشتیبان را از رابطه ۱۰ به دست آورد.

$$\dot{X}_B = 0 \quad (15)$$

با توجه به روابط گفته شده، جزییات محاسبات نیروهای متقابل بین اجزا و همچنین محاسبه سرعت پرتابه از لحظه برخورد تا انتهای فرآیند نفوذ، در مدل تحلیلی فلوز بیان نشده است، و به دست آوردن سرعت‌ها و جرم‌های فرسایش یافته اجزای مدل کار دشواری است، لذا به همین منظور به اصلاح مدل فلوز با توجه به جزییات هر قسمت از مدل تحلیلی پرداخته شده است و الگوریتم جدیدی براساس مدل اصلاحی، ارائه شده است.

#### اصلاحات انجام شده در مدل فلوز

به منظور بهبود نتایج مدل تحلیلی فلوز و همچنین جهت به دست آوردن پارامترهای مجهولی که بایستی در روابط کلی فلوز قرار گیرد، اصلاحاتی انجام شده که در ادامه به آنها اشاره شده است.

#### اصلاح سرعت پرتابه در زمان $\Delta t$ بعد از برخورد

در مدل تحلیلی فلوز رابطه ۲، یک رابطه کلی برای به دست آوردن نیروی پرتابه در هر بازه زمانی است. به کمک این رابطه می‌توان سرعت پرتابه را به دست آورد. اما همان طور که در این رابطه آمده، سرعت پرتابه فقط به استحکام مکانیکی پرتابه بستگی است. در صورتی که در حین فرآیند نفوذ پرتابه و حرکت آن به عواملی همچون چگالی و استحکام مکانیکی هدف نیز وابسته است. بنابراین باید از رابطه‌ای استفاده شود، که این شرایط را برای سرعت پرتابه، فراهم نماید. در رابطه ۱۶ از معادله تیت برای در نظر گرفتن شرایط پرتابه و هدف به طور همزمان استفاده شده است [25]. با جایگذاری رابطه ۱۶ در رابطه ۱۷ که مربوط به سایش پرتابه است و انتگرال گیری از آن رابطه ۱۸ که مربوط به تغییرات سرعت پرتابه است، به دست آمده است.

$$F_P = -M_P \ddot{X}_P \quad (2)$$

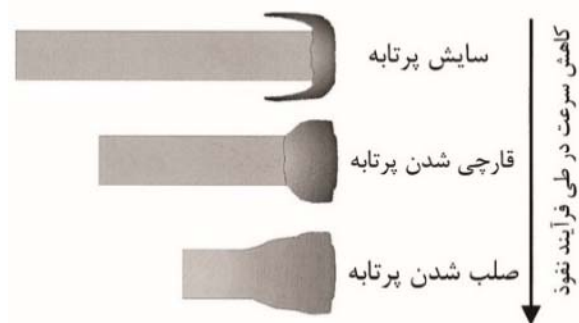
$$\Delta M_P = (\dot{X}_P - \dot{X}_{CF}) \Delta t \rho_P A_0 \quad (3)$$

$$\Delta M_C = (\dot{X}_{CF} - \dot{X}_C) \Delta t \rho_C A_0 \quad (4)$$

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

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

در این رابطه‌ها  $F_P$  نیروی پرتابه،  $M_P$  جرم پرتابه و  $\dot{X}_P$  شتاب پرتابه،  $\Delta M_P$  جرم ازدست رفته پرتابه،  $\dot{X}_P$  سرعت پرتابه، چگالی پرتابه و  $A_0$  سطح مقطع پرتابه،  $\dot{X}_C$  سرعت سرامیک زمانی که بین پرتابه و پشتیبان قرار دارد و  $\rho_C$  چگالی سرامیک است. همچنین  $\sigma_{CES}$  تنش مورد نیاز برای سایش سرامیک (مقاومت سایشی سرامیک) و  $\sigma_{PES}$  تنش مورد نیاز برای سایش پرتابه (مقاومت سایشی پرتابه) است. همچنین  $F_I$ ، به رفتار پرتابه در حین فرآیند نفوذ نیز بستگی دارد. که در محاسبات بایستی به این شرایط پرتابه نیز توجه داشت [3]. شکل ۲ این حالت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲ رفتار پرتابه در طول برخورد نسبت به کاهش سرعت [3]

در مدل فلوز نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی برحسب رادیان برای پرتابه با سرعت کمتر از ۱۰۰۰ متر بر ثانیه از رابطه ۷ به دست آمده است.

$$\varphi = \left( \frac{\dot{X}_P - 220}{780} \right) \frac{34\pi}{180} + \frac{34\pi}{180} \quad (7)$$

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. 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 تأثیرگذار است.

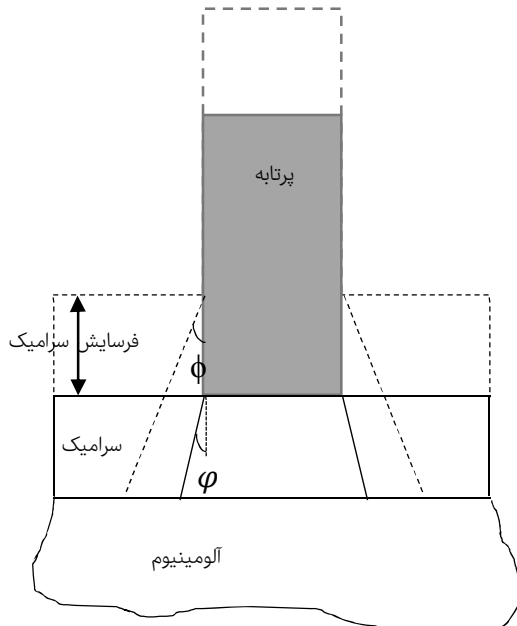
بنابراین، برای به دست آوردن سرعت جلوی سرامیک  $\dot{X}_{CF}$ ، باید سرعت ترک مخروطی  $\dot{X}_C$  که در حین فرآیند نفوذ ایجاد شده را به دست آورد. بدین منظور، جرم، سطح مقطع کوچک و بزرگ مخروط سرامیکی را با توجه به سرعت پرتابه و نیم‌زاویه تشکیل آن به کمک رابطه ۷ به دست آورده، و به کمک روابط ۸ و ۹، مقدار شتاب و سرعت سرامیک محاسبه می‌شود.

$$F_C - F_{C2} = M_C \ddot{X}_C \quad (8)$$

$$F_{C2} = \sigma_{CES} A_1 \quad (9)$$



پیش‌روی پرتابه سرعت آن کاهش می‌یابد، و در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که نیم‌زاویه مخروط نسبت به مقدار اولیه افزایش یابد، اما از طرفی ضخامت سرامیک نیز در حال کم شدن است، که این امر موجب کاهش بیشتر این نیم‌زاویه خواهد شد و در نهایت کاهش نیم‌زاویه مخروط اتفاق خواهد افتاد. این کاهش به صورت موازی با مقدار اولیه نیست، که شکل ۴ نشان‌دهنده این موضوع است.



شکل ۴ تأثیر کاهش نیم‌زاویه مخروط شکست با کاهش ضخامت سرامیک

بعد از تشکیل مخروط سرامیکی اول، پرتابه در صورت داشتن سرعت کافی برای نفوذ در سرامیک، از مخروط سرامیکی اول عبور کرده و مخروط سرامیکی جدید را تشکیل می‌دهد. در این زمان باید مقدار سایش سرامیک را برای تشکیل مخروط سرامیکی جدید در نظر گرفت. بنابراین بعد از تعیین نیم‌زاویه مخروط سرامیکی از رابطه ۱۹ و در صورت تکمیل شدن زمان تشکیل مخروط سرامیک از رابطه ۲۰ استفاده شده است. بنابراین از رابطه ۲۰ برای زمانی که پرتابه در حال پیش‌روی در سرامیک و سرامیک نیز در حال فرسایش است، برای به‌دست‌آوردن نیم‌زاویه مخروط سرامیکی جدید، استفاده شده است [9].

$$\varphi' = \frac{(\varphi - 34)\pi}{t_c \times 180} (t_c - x) + \frac{34\pi}{180} \quad (20)$$

که در این رابطه  $\varphi$  نیم‌زاویه قبلی یا اولیه مخروط سرامیکی،  $\varphi'$  نیم‌زاویه جدید مخروط سرامیکی،  $t_c$  ضخامت لایه سرامیکی و  $x$  مقدار عمق فرسایش در سرامیک است.

#### اصلاح مقاومت سرامیک در مقابل نفوذ پرتابه

در مدل فلوز مقدار مقاومت مکانیکی سرامیک در هر مرحله از فرآیند نفوذ، ثابت در نظر گرفته شده است. اما در عمل، در لحظه برخورد پرتابه به سرامیک، مقدار این مقاومت، بیشترین مقدار خود، یعنی مقاومت سرامیک سالم را دارد، ولی با گذشت زمان و پیش‌روی پرتابه به داخل سرامیک، مقاومت سرامیک کاهش

$$\frac{1}{2} \rho_t U^2 + \sigma_t = \frac{1}{2} \rho_p (V - U)^2 + Y_p \quad (16)$$

$$Y_p = -\rho_p l \frac{dv}{dt} \quad (17)$$

$$(\dot{X}_p - \dot{X}_{OP}) \rho_p L_p = -(\sigma_t + \frac{1}{2} \rho_c \dot{X}_{OP}^2) \Delta t \quad (18)$$

در این روابط،  $\rho_t$  چگالی هدف،  $\rho_p$  چگالی پرتابه،  $V$  سرعت قسمت صلب پرتابه،  $U$  سرعت قسمت جلوی پرتابه،  $Y_p$  مقاومت پرتابه،  $\dot{X}_{OP}$  سرعت پرتابه در بازه زمانی قبلی،  $\dot{X}_p$  سرعت پرتابه در بازه زمانی فعلی است،  $L_p$  طول پرتابه در بازه زمانی فعلی و شدت تنش یا استحکام مکانیکی هدف است. لازم به ذکر است که اگر پرتابه در تقابل با سرامیک باشد، باید به جای  $\sigma_t$  از استحکام مکانیکی سرامیک استفاده کرد و اگر پرتابه در تقابل با آلومینیوم باشد، باید به جای  $\sigma_t$  از استحکام مکانیکی آلومینیوم در آن استفاده کرد.

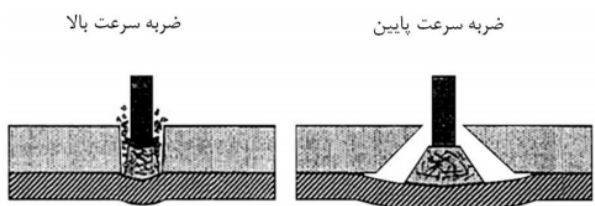
#### اصلاحات نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی

##### الف) تغییر نیم‌زاویه مخروط سرامیکی با سرعت برخورد پرتابه:

مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی با سرعت برخورد پرتابه و ضخامت سرامیک، 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 برای سرعت‌های بالای ۱۰۰۰ متر بر ثانیه برابر ۶۸ درجه در نظر گرفته بود [3]. اما در واقعیت مقدار این نیم‌زاویه با افزایش سرعت برخورد کاهش می‌یابد، که این مطلب خلاف نظریه فلوز است. در شکل ۳ تفاوت این زاویه با سرعت‌های کم و زیاد نشان داده شده است. در اصلاح مقدار این نیم‌زاویه مخروط سرامیکی از رابطه خطی ۱۹، مقدار  $\varphi$  برحسب درجه به‌دست می‌آید که باید به جای رابطه ۷ از رابطه ۱۹ استفاده نمود.

$$\varphi = \frac{5\pi}{400 \times 180} [-\dot{X}_p + 1000] + \frac{63\pi}{180} \quad (19)$$

در این رابطه مقدار نیم‌زاویه مخروط سرامیکی بین ۶۳ تا ۶۸ درجه به صورت خطی تغییر می‌کند. 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.



شکل ۳ تغییر نیم‌زاویه شکست مخروطی در سرعت‌های مختلف [9]

##### ب) تغییر نیم‌زاویه مخروط سرامیکی براساس فرسایش سرامیک و

##### زمان تشکیل مخروط سرامیکی: طبق نظریه وود وارد و فلوز [3, 35]

در هنگام پیش‌روی پرتابه در سرامیک، ترک نیم‌زاویه به صورت موازی با مقدار اولیه‌اش کاهش می‌یابد. اما در عمل با پیش‌روی پرتابه در داخل سرامیک و فرسایش آن، نیم‌زاویه مخروط سرامیکی نیز تغییر خواهد کرد. این مورد به دلیل این اتفاق می‌افتد که با

## اصلاح طول پرتابه

سه حالت برای پرتابه براساس سرعت برخورد و مقاومت آن در نظر گرفته شده است. حالت ابتدایی فرسایش پرتابه، بعد فارچی 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 فرسایش می‌شود. در مدل فلوز مقدار فرسایش به وسیله کاهش جرم پرتابه، بدون در نظر گرفتن تغییرات سرعت پرتابه و سرعت جلوی سرامیک در بازه زمانی  $\Delta t$ ، محاسبه شده است. به منظور اصلاح این رابطه از معادله ۲۴ مقدار طول پرتابه بعد از فرسایش محاسبه می‌شود:

$$\frac{dL}{dt} = -(\dot{X}_P - \dot{X}_{CF}) \quad (24)$$

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. تغییرات سرعت پرتابه در معادله ۲۵ و تغییرات سرعت جلوی سرامیک در معادله ۲۶ آمده است.

$$\dot{X}_P = \frac{\dot{X}_{P2} - \dot{X}_{P1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{P1} \quad (25)$$

$$\dot{X}_{CF} = \frac{\dot{X}_{CF2} - \dot{X}_{CF1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{CF1} \quad (26)$$

در این رابطه‌ها،  $\dot{X}_{P1}$  سرعت پرتابه در لحظه  $t_1$ ،  $\dot{X}_{P2}$  سرعت پرتابه در لحظه  $t_2$ ،  $\dot{X}_{CF1}$  سرعت جلوی سرامیک در لحظه  $t_1$  و  $\dot{X}_{CF2}$  سرعت جلوی سرامیک در لحظه  $t_2$  است. با جایگذاری روابط ۲۵ و ۲۶ در معادله ۲۴ و انتگرال‌گیری از آن در بازه ابتدا و انتهای  $\Delta t$  مقدار طول نهایی پرتابه بعد از فرسایش طبق رابطه ۲۷ مشخص می‌شود.

$$\frac{dL}{dt} = - \left( \left( \frac{\dot{X}_{P2} - \dot{X}_{P1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{P1} \right) - \left( \frac{\dot{X}_{CF2} - \dot{X}_{CF1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{CF1} \right) \right) \quad (27)$$

## اصلاح جرم پشتیبان فلزی

در بخش پایانی از مرحله نفوذ در بازه‌های زمانی مشخص باید مقدار سایش فلز پشتیبان محاسبه شود. زمانی که هنوز سرامیک به طور کامل فرسایش نیافته باشد، این مقدار کوچک است. در مواردی که پشتیبان دچار فرسایش 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 به صورت معادلات ۲۸ و ۲۹ در نظر گرفته شده است.

$$\dot{X}_B = \frac{\dot{X}_{B2} - \dot{X}_{B1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{B1} \quad (28)$$

$$\dot{X}_{BF} = \frac{\dot{X}_{BF2} - \dot{X}_{BF1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{BF1} \quad (29)$$

در این رابطه‌ها،  $\dot{X}_{B1}$  سرعت پشتیبان در لحظه  $t_1$ ،  $\dot{X}_{B2}$  سرعت پشتیبان در لحظه  $t_2$ ،  $\dot{X}_{BF1}$  سرعت جلوی پشتیبان در لحظه  $t_1$  و  $\dot{X}_{BF2}$  سرعت جلوی پشتیبان در لحظه  $t_2$  است. این روابط با در نظر گرفتن تغییرات سرعت نسبت به زمان که برابر است با شتاب، برای فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان به دست آمده است:

می‌یابد که این مشکل در مدل فلوز در سرعت‌های پایین پرتابه، بیشتر مدل را دچار خطا می‌کند. بنابراین می‌توان گفت، مقاومت سرامیک خردشده، از سرامیک سالم کمتر است. لذا با توجه به این مورد و قرارداد مقاومت سرامیک خردشده در هنگام نفوذ پرتابه در رابطه ۵ و ۱۶، مقدار سرعت پرتابه و عمق نفوذ با دقت بیشتری، به دست می‌آید. بدین منظور، با استفاده از نظریه ویلکینز، برای به دست آوردن مقدار مقاومت سرامیک خردشده از رابطه ۱۹ در هر مرحله از فرآیند نفوذ، استفاده می‌شود [26].

$$Y_C = Y_{CO} \left( \frac{\dot{X}_{P \text{ phase1}}}{\dot{X}_P} \right) \quad (21)$$

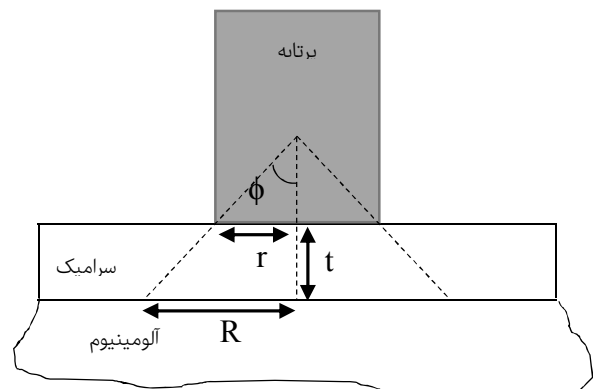
در این رابطه  $Y_C$  مقاومت سرامیک خردشده،  $Y_{CO}$  مقاومت سرامیک سالم،  $\dot{X}_P$  سرعت نفوذ و  $\dot{X}_{P \text{ phase1}}$  سرعت پرتابه در پایان مرحله اول نفوذ است. اما نکته‌ای که باید در زره‌های نیمه‌بمنهایت مورد توجه قرار داد، این است که سرعت صفحه پشتیبان به دلیل ضخامت زیادی که دارد، برابر صفر در نظر گرفته می‌شود که طبق رابطه بالا نشان‌دهنده این است که صفحه پشتیبان نقش مهمی در استحکام مکانیکی سرامیک پس از برخورد دارد و از آن محافظت می‌کند که در نتیجه پس از برخورد پرتابه، کاهش استحکام مکانیکی سرامیک در پشتیبان ضخیم با شتاب کمتری نسبت به پشتیبان نازک صورت می‌گیرد.

## اصلاح جرم مخروط سرامیکی

در مدل فلوز رابطه مشخصی برای به دست آوردن جرم مخروط سرامیکی ارائه نشده است تا امکان محاسبه شتاب سرامیک را از طریق رابطه ۸ به دست آورد و فقط روابط ۴ و ۱۱ برای مقدار فرسایش سطح جلو و عقب سرامیک به کار برده شده است. بنابراین محاسبه جرم مخروط از طریق این روابط همراه با خطا است. حال با توجه به این که دانستن جرم مخروط سرامیکی برای محاسبات مهم است، لذا از رابطه ۲۲ می‌توان حجم مخروط سرامیکی را با توجه به ضخامت، سطح مقطع پرتابه و نیم‌زاویه مخروط سرامیکی به دست آورد و سپس از رابطه ۲۳ جرم مخروط را محاسبه کرد. در شکل ۵ مخروط سرامیکی تشکیل شده بعد از برخورد پرتابه نشان داده شده است.

$$V_C = \frac{1}{3} \pi t_C (R^2 + r^2 + Rr) \quad (22)$$

$$M_C = \rho_C \times V_C \quad (23)$$



شکل ۵) تشکیل مخروط سرامیکی بعد از برخورد

بنابراین برای محاسبه مقدار کاهش جرم فلز پشتیبان ابتدا به کمک روابط ۲۸ و ۲۹ مقادیر سرعت‌های فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان محاسبه می‌شود. سپس با جایگذاری این مقادیر در معادله ۱۲ و انتگرال‌گیری در بازه زمانی مورد نظر، مقدار کاهش جرم پشتیبان طبق رابطه ۳۰ محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_{pl}^D = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 + D_5 \hat{\theta}] \quad (34)$$

کرنش  $\varepsilon_{pl}^D$  مربوط به شروع تخریب،  $D_1$  تا  $D_5$  ضرایب ثابت مربوط به آزمایش،  $\eta$  نسبت سه‌محوره بودن تنش،  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک،  $\dot{\varepsilon}_0$  نرخ کرنش مربوط به اندازه‌گیری ثابت‌های آزمایش و  $\hat{\theta}$  دمای فلز است. در این رابطه براکت اول نشان‌دهنده تأثیر مقدار  $\eta$  بر  $\varepsilon_{pl}^D$  است. براکت دوم نشان‌دهنده تأثیر نرخ کرنش بر  $\varepsilon_{pl}^D$  است و براکت سوم نیز تأثیر دما بر  $\varepsilon_{pl}^D$  را نشان می‌دهد. جدول‌های ۱ تا ۴، ضرایب مدل جانسون-کوک و همچنین ضرایب پارگی معیار جانسون-کوک را برای دو فلز تانتالیوم و آلومینیوم نشان می‌دهند.

جدول ۱) ثوابت مدل جانسون-کوک برای آلومینیوم [27, 28]

پارامتر	مقدار
A (MPa)	۳۲۴
B (MPa)	۱۱۴
n	۰/۴۲
C	۰/۰۰۲
m	۱/۳۴
$\dot{\varepsilon}_0$	۱
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۰۰

جدول ۲) ثابت‌های گسیختگی ماده برای آلومینیوم [27, 28]

پارامتر	مقدار
$\sigma_{BES}$ (MPa)	۴۰۰
v	۰/۳۳
E (GPa)	۶۸
G (GPa)	۲۶
D <sub>1</sub>	-۰/۷۷
D <sub>2</sub>	۱/۴۵
D <sub>3</sub>	-۰/۴۷
D <sub>4</sub>	۰
D <sub>5</sub>	۱/۶

جدول ۳) ثوابت مدل جانسون-کوک برای تانتالیوم [29]

پارامتر	مقدار
A (MPa)	۶۸۴/۵
B (MPa)	۲۰۵/۳
n	۰/۷۸
C	۰/۱
m	۰/۴۲۵
$\dot{\varepsilon}_0$	۳۵۰۰
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۶۶۵۰

بنابراین برای محاسبه مقدار کاهش جرم فلز پشتیبان ابتدا به کمک روابط ۲۸ و ۲۹ مقادیر سرعت‌های فلز پشتیبان و جلوی فلز پشتیبان محاسبه می‌شود. سپس با جایگذاری این مقادیر در معادله ۱۲ و انتگرال‌گیری در بازه زمانی مورد نظر، مقدار کاهش جرم پشتیبان طبق رابطه ۳۰ محاسبه می‌شود.

$$\Delta M_B = \left( \left( \frac{\dot{X}_{BF2} - \dot{X}_{BF1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{BF1} \right) - \left( \frac{\dot{X}_{B2} - \dot{X}_{B1}}{t_2 - t_1} (t - t_1) + \dot{X}_{B1} \right) \right) \Delta t \rho_B A_1 \quad (30)$$

## مدل عددی

### مدل‌سازی رفتاری مواد

اجزای تشکیل‌دهنده هدف، سرامیک و آلومینیوم و جنس پرتابه نیز از تانتالیوم است، برای مدل‌کردن پرتابه و هدف، می‌توان از معیارهای گوناگونی که در نرم‌افزار وجود دارد استفاده نمود، اما با توجه به سرعت‌های برخورد پرتابه به هدف، برای سرامیک، از پارامترهای مدل جانسون-هالمکوئیست استفاده شده که مواد ترد را به خوبی پوشش می‌دهد. همچنین برای تانتالیوم و آلومینیوم که جزء فلزات تغییر شکل‌پذیر هستند، از معیار و مدل جانسون-کوک استفاده شده است.

### مدل ماده جانسون-کوک

این مدل، رفتار مواد را تحت کرنش‌های زیاد، نرخ کرنش و دمای بالا به خوبی پوشش می‌دهد. لذا برای مسایلی از جمله ضربه، شکل‌دهی فلزات بسیار مناسب است. که این مدل به صورت روابط ۳۱ و ۳۲ بیان شده است [27].

$$\sigma^{pl} = [A + B(\varepsilon^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - \hat{\theta}^m] \quad (31)$$

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & : \theta < \theta_{Tran} \\ \frac{\theta - \theta_{Tran}}{\theta_{melt} - \theta_{Tran}} & : \theta_{Tran} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & : \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (32)$$

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. این سه ثابت با آزمون کشش استاتیکی تعیین می‌شوند و به همین دلیل به آنها ثوابت شبه‌استاتیکی می‌گویند. ثوابت  $C$  و  $m$  توسط آزمون‌های پیچش در نرخ کرنش‌ها و دماهای متفاوت و آزمون فشار تعیین می‌شوند.

### معیار شکست جانسون-کوک

معیار گسیختگی جانسون-کوک، یک حالت خاص از آسیب نرم است که پارامتر آسیب در این معیار برای یک المان به صورت رابطه ۳۳ بیان شده است [28].

$$\omega = \Sigma \left( \frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{\dot{\varepsilon}_f^{pl}} \right) \quad (33)$$

در این رابطه  $\Delta \varepsilon^{pl}$  نمو کرنش پلاستیک موثر در طی یک چرخه و

پارامتر	مقدار
$\sigma_{BES}$ (MPa)	۹۰۰
$\nu$	۰/۳۵
E (GPa)	۱۸۶
G (GPa)	۶۹
D <sub>1</sub>	۰/۷
D <sub>2</sub>	۰/۳۲
D <sub>3</sub>	-۱/۵
D <sub>4</sub>	۰
D <sub>5</sub>	۰

ادامه معادلات فشار- چگالی در این مدل توسط روابط ۳۹ و ۴۰ بیان می‌شود.

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \text{ if } \mu \geq 0 \quad (39)$$

$$P = K_1\mu \text{ if } \mu \leq 0 \quad (40)$$

که در آن  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$  و  $K_1$  ضریب بالک،  $K_2$  و  $K_3$  ضرایب فشار هستند. جدول ۵، ثوابت مدل جانسون- هالمکوئیست برای ماده آلومینا ۸۵٪ را نشان می‌دهد.

جدول ۵) ثابت‌های مدل جانسون- هالمکوئیست برای آلومینا ۸۵٪<sup>[32]</sup>

پارامتر	مقدار
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۳۴۲۰
T (GPa)	۰/۱۵۵
$P_{HEL}$ (GPa)	۱/۹۳
G (GPa)	۹۰
D <sub>1</sub>	۰/۰۵
D <sub>2</sub>	۱
K <sub>1</sub>	۱۳۸
K <sub>2</sub>	۰
K <sub>3</sub>	۰
HEL (GPa)	۶
$\dot{\epsilon}_0$	۱
M	۰/۶
C	۰
N	۰/۶۴
B	۰/۲۸
A	۰/۸۸

### مدل و معیار جانسون- هالمکوئیست (JH-2)

صفحه جلوی هدف از جنس سرامیک است، این ماده بسیار سخت و ترد است و اغلب تحت شرایط بار فشاری استفاده می‌شود و تنها کشش بسیار کمی را می‌تواند تحمل کند. مواد سرامیکی اغلب در کاربردهای حفاظتی استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر جانسون و هالمکوئیست مجموعه‌ای از روابط را برای شبیه‌سازی پاسخ مواد سرامیکی تحت کرنش بالا، نرخ کرنش بالا و شرایط ضربه فشار بالا توسعه داده‌اند، که مدل JH-2 مدل مناسب برای مطالعه ضربه بر روی سرامیک و مواد ترد است که استحکام ماده برحسب تنش فون- مایسز معادل نرمالیزه به‌صورت رابطه ۳۵ بیان شده است.<sup>[30]</sup>

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (35)$$

که در آن  $\sigma_i^*$  تنش معادل سالم بی‌بعد،  $\sigma_f^*$  تنش معادل شکست بی‌بعد و  $D$  متغیر آسیب است. این تنش‌های گفته‌شده دارای فرم کلی،  $\sigma^* = \sigma/\sigma_{HEL}$  هستند. که در آن  $\sigma$  تنش معادل فون- مایسز واقعی و  $\sigma_{HEL}$  تنش معادل در حد الاستیک است. این مدل فرض می‌کند که تنش‌های نرمالیزه سالم و شکست می‌توانند، به‌صورت تابعی از فشار و نرخ کرنش به‌صورت روابط ۳۶ و ۳۷ بیان شوند:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq \sigma_i^{max} \quad (36)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq \sigma_f^{max} \quad (37)$$

که در آن  $A, B, C, M, N$  پارامترهای ماده بوده و  $\sigma_i^{max}$  و  $\sigma_f^{max}$  حدود اختیاری استحکام‌ها هستند. فشار بی‌بعد به‌صورت  $P^* = P/P_{HEL}$  تعریف می‌شود که در آن  $P$  فشار واقعی و  $P_{HEL}$  فشار معادل در حد الاستیک است. فشار هیدرواستاتیک کششی ماکزیمم بی‌بعد به‌صورت  $T^* = T/T_{HEL}$  است که در آن  $T$  فشار کششی ماکزیمم است، که ماده می‌تواند تحمل کند. لذا پارامتر شروع آسیب طبق رابطه ۳۳ با کرنش پلاستیک رابطه دارد. شروع آسیب طبق رابطه ۳۳ با کرنش پلاستیک رابطه دارد. کرنش پلاستیک معادل برای شکست تحت فشار ثابت بوده، و به‌صورت رابطه ۳۸ تعریف می‌شود.

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (38)$$

مدل JH-2 فرض می‌کند که با قراردادن  $D = \omega$  متغیر آسیب به‌طور تدریجی با تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد. که در

از آنجایی که مدل ماده جانسون- هالمکوئیست، تنها در سابروتین نرم‌افزار آباکوس در دسترس است، و در محیط حل‌گر نرم‌افزار، به‌طور مستقیم قابل‌دسترسی نیست و امکان تعریف پارامترها و ضرایب در آن به‌صورت مستقیم وجود ندارد، لذا برای وارد کردن ثوابت این مدل برای سرامیک، به دو روش می‌توان عمل کرد:

- ۱- به‌کمک زبان برنامه‌نویسی فورترن و با ایجاد کدهایی در سابروتین آباکوس این ضرایب ماده را در VUMAT نرم‌افزار نوشت، و سپس حل را اجرا نمود، که این کار نیاز به تخصص و مهارت کافی در زمینه برنامه‌نویسی و سابروتین‌نویسی دارد.
- ۲- برای دستیابی به رفتار ماده مشابه با مدل جانسون- هالمکوئیست، برای سرامیک‌ها و تبدیل پارامترهای آن به مدلی که برای حل‌گر نرم‌افزار آباکوس به‌صورت مستقیم قابل‌دسترسی و آسان باشد، از ترکیبی از مدل پلاستیسیته دراگر پراگر (Drucker Prager) و یک معادله حالت به نام مای- گرونایزن (Mie-Gruneisen) استفاده کرد. که در زیر به آنها اشاره می‌کنیم.

### مدل پلاستیسیته دراگر پراگر

در این مدل از فرم نمایی کلی به‌صورت رابطه ۴۱ استفاده شده است.<sup>[31, 33]</sup>

$$\sigma = \frac{1}{a^{1/b}} (P + P_t)^{1/b} \quad (41)$$

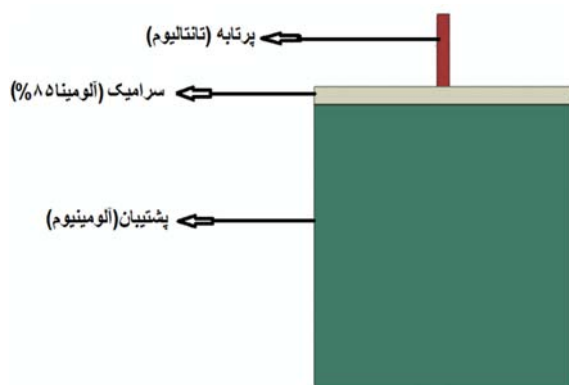


پارامتر	مقدار
a	$1 \times 10^{-2} / 20.8284$
b	۱/۵۶۲۵
s	۰/۵
$c_0$ (m/s)	$63.52 / 234.032$
$\Gamma_0$	۰
$\sigma_c$ (MPa)	۵۴۴/۱۵
انرژی شکست	۰

### مدل سازی هندسی

مدل تحلیلی فلوز و برتون<sup>[3]</sup> مورد بررسی قرار گرفته است که با نتایج تجربی بلس و همکاران<sup>[2]</sup> صحت سنجی شده است. بنابراین برای شبیه سازی عددی نیز از این مدل برای صحت سنجی استفاده شده است. در این مدل شبیه سازی عددی نفوذ یک پرتابه میله بلند سر تخت در هدف سرامیک- آلومینیوم انجام شده است. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده، این مدل از یک زره ضخیم نیمه بی نهایت، که سطح جلوی آن یک صفحه سرامیک و یک لایه پشتیبان ضخیم نیز از جنس آلومینیوم در پشت آن قرار گرفته، تشکیل شده است.

صفحه سرامیکی دارای ابعاد  $0.05 \times 0.05$  و با ضخامت  $9/3$  میلی متر و از جنس آلومینا ۸۵% است. قدرت حد الاستیک برای سرامیک  $6$  گیگاپاسکال است. صفحه آلومینیومی دارای ابعاد  $0.05 \times 0.05$  و با ضخامت  $100$  میلی متر و از نوع آلومینیوم 6061 T651 و دارای شدت تنش  $400$  مگاپاسکال است. همچنین پرتابه سر تخت میله بلند، از جنس تانتالیوم و با قطر  $4/9$  میلی متر است که نسبت طول به قطر آن  $5$  است. بنابراین طول آن  $24/5$  میلی متر و جرم آن  $8$  گرم است. پرتابه تانتالیوم دارای نرخ کرنش بالا و شدت تنش  $900$  مگاپاسکال است.



شکل ۶) نمایی از هدف نیمه بی نهایت شامل سرامیک/آلومینیوم و پرتابه سر تخت

با توجه به تقارن موجود در مدل هندسی و نیز شرایط مرزی، و کاهش زمان حل، از شرایط تقارن برای مدل سازی استفاده شده است. در سطوح جانبی هدف نیز کلیه درجات آزادی جابه جایی

که در این رابطه  $a$  و  $b$  پارامترهای ماده هستند، که با کمک روابط ۴۳ و ۴۴ به دست می آیند. معادله ۴۱ بسیار شبیه به معادله استحکام مدل جانسون- هالمکوئیست (رابطه ۴۲) است.

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{HELA}}{P_{HEL}^N} (P + T)^N \quad (42)$$

با مقایسه رابطه (۴۱) و (۴۲)، ضرایب مورد نیاز مطابق روابط (۴۳)، (۴۴) و (۴۵) به دست می آیند.

$$a = \frac{P_{HEL}}{(A \times \sigma_{HELA})^{\frac{1}{N}}} \quad (43)$$

$$b = \frac{1}{N} \quad (44)$$

$$P_t = T \quad (45)$$

که به کمک این روابط پارامترهای  $a$  و  $b$  که پارامترهای مدل پلاستیسیته دراگر پراگر هستند، به دست می آیند، که در نتیجه با استفاده از رابطه (۴۶) تنش فشاری تک محوره  $\sigma_c$ ، که در آن سرامیک تسلیم می شود، تعیین شده است.

$$P_t = a \sigma_c^b - \frac{\sigma_c}{3} = T \quad (46)$$

با در اختیار داشتن  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ ، رابطه (۴۷) خواهد آمد.

$$P = P_{HEL} \left( \frac{\bar{\epsilon}_f^{pl}}{D_1} \right)^{1/D_1} - T \quad (47)$$

با جایگذاری رابطه (۴۱)، در رابطه (۴۰) معادله نهایی بین  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  و تنش سه محوره مورد نیاز برای معیار شروع آسیب ماده نرم به دست می آید. با انتخاب چندین نقطه برای  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ ، جدول داده های تنش سه محوره در شروع آسیب ایجاد می شود، که این مقادیر را می توان برای تعریف خواص سرامیک و آسیب سرامیک در آباکوس به کار برد. همچنین کرنش پلاستیک معادل نیز برای شروع آسیب با انتخاب چندین نقطه برای نرخ کرنش به وجود آمده در این آسیب از رابطه (۴۸) به دست آمده است، که مقادیر آن را می توان برای تعریف خواص آسیب سرامیک استفاده نمود.

$$\sigma \bar{\epsilon}_c^{pl} = \sigma_c \bar{\epsilon}_c^{pl} \quad (48)$$

### معادله حالت مای- گرونایزن

برای توصیف رفتار هیدرودینامیکی ماده از معادله حالت مای- گرونایزن استفاده شده است. که این معادله حالت، نسبت به انرژی، خطی بوده و رایج ترین فرم آن که فشار بدون مشارکت انرژی بیان می شود، به صورت رابطه (۴۹) بیان می شود<sup>[34]</sup>.

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (49)$$

که در آن  $\eta = 1 - \rho_0/\rho$  و  $\rho = \mu/(1 + \mu)$  است که با استفاده از بسط تیلور نسبت به  $\mu$  ضرایب خطی و درجه دو چند جمله ای رابطه فشار- چگالی مدل جانسون- هالمکوئیست یعنی  $K_1$  و  $K_2$  به صورت روابط (۵۰) و (۵۱) به دست می آیند.

$$K_1 = \rho_0 c_0^2 \quad (50)$$

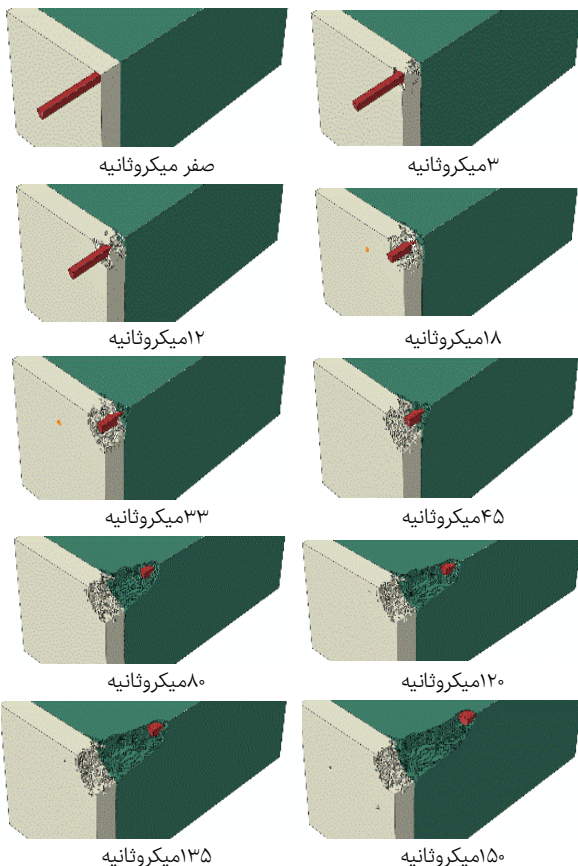
$$K_2 = \rho_0 c_0^2 (2s - 1) \quad (51)$$

بنابراین با استفاده از روابط بیان شده، پارامترهای  $s$  ضریب آنتروپی و  $c_0$  سرعت صوت در ماده، به دست خواهند آمد. در جدول ۶ پارامترهای ماده مربوط به مدل پلاستیسیته دراگر پراگر و معادله حالت مای- گرونایزن فرم خطی برای ماده آلومینا ۸۵% آمده است.

## صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده

نیم‌برشی از فرآیند نفوذ مرحله به مرحله پرتابه سرخت که با سرعت ۱۳۵۰ متر بر ثانیه به هدف نیمه‌بی‌نهایت سرامیک-آلومینیوم برخورد کرده است، در مدت زمان ۱۵۰ میکروثانیه در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل تشکیل ترک‌های شعاعی در سرامیک دیده می‌شود و ترک مخروطی در سرامیک، وقتی که پرتابه به داخل سرامیک نفوذ می‌کند، کاملاً مشخص است. همچنین نفوذ این ترک مخروطی همراه با پرتابه به داخل آلومینیوم و فرسایش پشتیبان به همراه فرسایش هدف و پرتابه در طول فرآیند نفوذ مشاهده می‌شوند. در نهایت پرتابه فرسایش یافته و به عمق ۳۴/۴ میلی‌متر در داخل پشتیبان نفوذ می‌کند و سرعت آن صفر می‌شود. فرسایش پرتابه و صفحه پشتیبان از ابتدا تا انتها مشخصاً دیده می‌شود، با کمی دقت در این شکل، منطقه آسیب در محل نفوذ پرتابه مشخص است.

در نمودار ۲ نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در این نمودار نتایج تجربی با خطای ۱۰٪ نشان داده شده است. در سرعت‌های بالا میزان این خطا بیشتر است اما همان‌طور که مشخص است حداکثر خطا نیز کمتر از ۱۰٪ است. بنابراین مدل عددی از تطابق خوبی با نتایج تجربی برخوردار است.

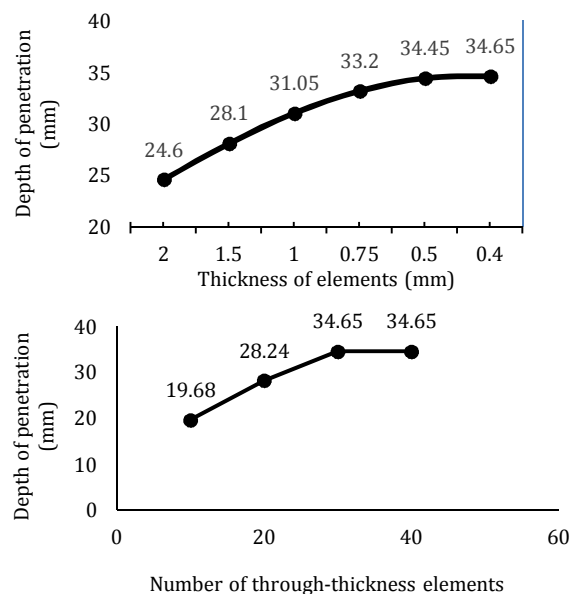


شکل ۷) فرآیند نفوذ پرتابه در مدت زمان ۱۵۰ میکروثانیه، در سرعت ۱۳۵۰ متر بر ثانیه

بسته شده است. در این شبیه‌سازی از سیستم واحد متریک (متر، کیلوگرم، نیوتن، ثانیه) استفاده شده است. با توجه به موارد بیان‌شده، شکل هدف مورد نظر را به همراه پرتابه به صورت شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که برای سرعت‌های ۱۹۶۰ و ۲۵۰۰ متر بر ثانیه، به دلیل اینکه سرعت خیلی بالا است، یک صفحه به ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر از جنس پشتیبان، در جلوی صفحه سرامیک قرار می‌دهند، تا از متلاشی‌شدن سرامیک در لحظه برخورد پرتابه جلوگیری شود، تا بتوان رفتار سرامیک را به‌طور صحیح مورد ارزیابی قرار داده و فرآیند نفوذ را بررسی کرد. بنابراین شکل هندسی هدف در این دو سرعت مانند شکل ۶ است، با این تفاوت که یک صفحه با ابعاد ۵۰×۵۰ و با ضخامت ۱۲/۷ میلی‌متر، از جنس پشتیبان، جلوی هدف قرار می‌گیرد.

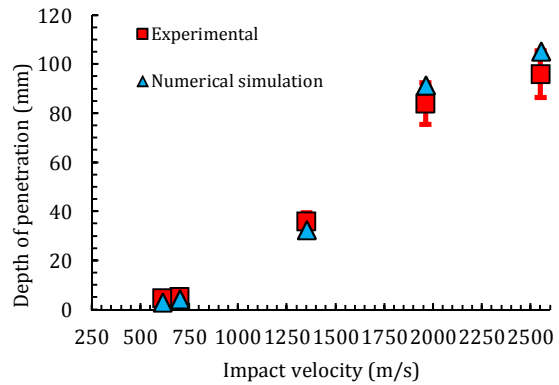
## بررسی همگرایی مش

در تحلیل مسایل ضربه، برخورد و مواردی که آسیب سریع و تغییر شکل سریع در آنها وجود دارد، حساسیت بیش‌ازحد پاسخ به اندازه مش وجود دارد. این بدان معنا است که هر چقدر اندازه مش کوچک‌تر باشد، جواب شبیه‌سازی به نتایج یکسان نزدیک‌تر است و بایستی آنقدر اندازه مش‌ها را کوچک و کوچک‌تر نمود تا بالاخره جواب‌ها تغییر چندانی محسوس نداشته باشند و در اصلاح همگرا شوند. چون هدف اندازه‌گیری عمق نفوذ و در اصطلاح اندازه‌گیری جابه‌جایی است، بنابراین تنش‌ها و کرنش‌ها با استفاده از تغییرات جابه‌جایی محاسبه می‌شوند، لذا اندازه مش بسیار مهم است و نیاز به اندازه مش ریزتری است. چندین آزمایش با اندازه مش‌های مختلف در راستای ضخامت هدف برای سرعت پرتابه ۱۳۵۰ متر بر ثانیه انجام گرفته است، و نتایج آن در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، ضخامت المان ۰/۴ و تعداد المان‌ها در راستای ضخامت نیز ۳۰ عدد در نظر گرفته شده است.



نمودار ۱) بررسی تأثیر تغییرات اندازه المان‌ها بر مقدار عمق نفوذ

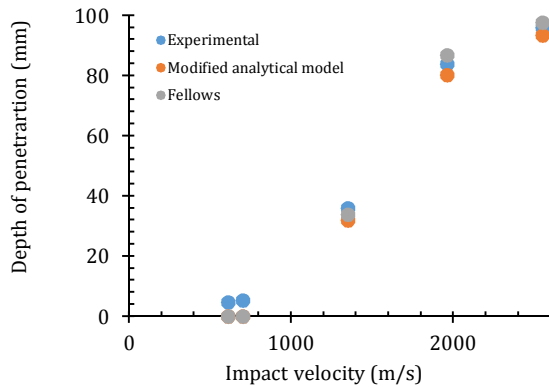
مقادیر عمق نفوذ بین مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح چهارم و مدل فلوز در نمودار ۶ مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، اصلاح جرم سرامیک موجب افزایش عمق نفوذ نسبت به مدل فلوز شده است. اصلاح جرم سرامیک موجب می شود تا مقدار فرسایش سرامیک و جرم محدود شده به مخروط سرامیکی کاهش یابد؛ بنابراین عمق نفوذ افزایش یافته است. در سرعت های پایین این اصلاح، عمق نفوذ را نسبت به مدل فلوز نزدیک تر به نتایج تجربی پیش بینی کرده است اما در سایر سرعت ها موجب بهبود پیش بینی عمق نفوذ نشده است.



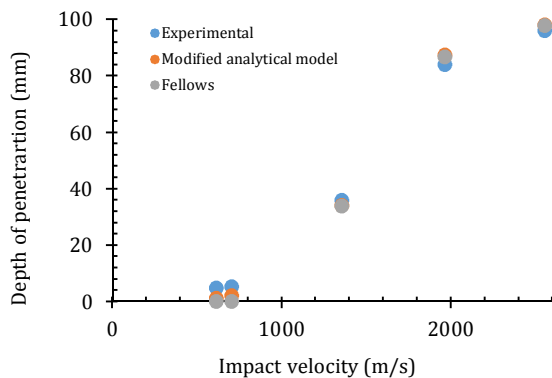
نمودار ۲) مقایسه عمق نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک- فلز بین آزمایش تجربی<sup>[۲]</sup> و شبیه سازی عددی

### مقایسه نتایج

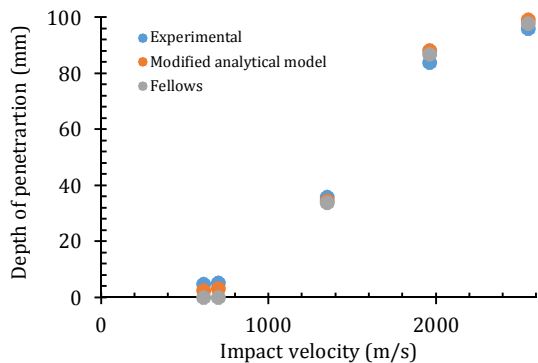
هر کدام از اصلاحات به تنهایی موجب افزایش و یا کاهش عمق نفوذ نسبت به نتایج تجربی می شود و این به معنی بهبود نتایج نیست. در نمودار ۳ مقایسه مقادیر عمق نفوذ بین مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح اول با مدل فلوز نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، اصلاح سرعت پرتابه موجب کاهش عمق نفوذ در سرعت های بالا و افزایش عمق نفوذ در سرعت های پایین نسبت به مدل فلوز شده است. اصلاح تغییر سرعت پرتابه در هر بازه زمانی موجب می شود تا سرعت پرتابه در آن بازه زمانی به صورت میانگین در نظر گرفته شود و نسبت به حالتی که سرعت در انتهای بازه زمانی در نظر گرفته شده باشد، مقادیر کمتری دارد؛ بنابراین عمق نفوذ کاهش یافته است. در سرعت های پایین این اصلاح، عمق نفوذ را نسبت به مدل فلوز تغییری نداده است، در سایر سرعت ها نیز موجب بهبود پیش بینی عمق نفوذ نشده است.



نمودار ۳) مقایسه مقادیر عمق نفوذ برای مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح اول و مدل فلوز



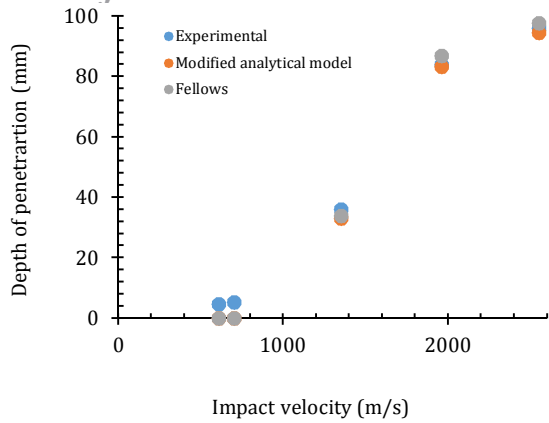
نمودار ۴) مقایسه مقادیر عمق نفوذ برای مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح دوم و مدل فلوز



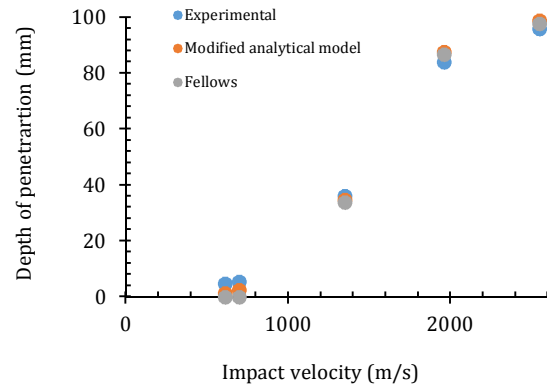
نمودار ۵) مقایسه مقادیر عمق نفوذ برای مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح سوم و مدل فلوز

مقادیر عمق نفوذ بین مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح دوم و مدل فلوز در نمودار ۴ مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، اصلاح تغییر نیم زاویه مخروط سرامیکی موجب افزایش عمق نفوذ نسبت به مدل فلوز شده است. اصلاح نیم زاویه مخروط سرامیکی موجب می شود تا مخروط سرامیکی کوچک تر شده و ضمن افزایش نیروی وارده از طرف پرتابه به فلز پشتیبان، سرامیک نیز زودتر فرسایش یابد؛ بنابراین عمق نفوذ افزایش یافته است. در سرعت های پایین این اصلاح، عمق نفوذ را نسبت به مدل فلوز نزدیک تر به نتایج تجربی پیش بینی کرده است اما در سایر سرعت ها موجب بهبود پیش بینی عمق نفوذ نشده است.

مقادیر عمق نفوذ بین مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح سوم و مدل فلوز در نمودار ۵ مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، اصلاح مقاومت سرامیک موجب افزایش عمق نفوذ نسبت به مدل فلوز شده است. اصلاح مقاومت سرامیک موجب می شود تا مقاومت سرامیک کاهش یابد؛ بنابراین عمق نفوذ افزایش یافته است. در سرعت های پایین این اصلاح، عمق نفوذ را نسبت به مدل فلوز نزدیک تر به نتایج تجربی پیش بینی کرده است اما در سایر سرعت ها موجب بهبود پیش بینی عمق نفوذ نشده است.



نمودار ۸) مقایسه مقادیر عمق نفوذ برای مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح ششم و مدل فلوز



نمودار ۶) مقایسه مقادیر عمق نفوذ برای مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح چهارم و مدل فلوز

در این بخش، با توسعه شبیه‌سازی عددی به مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی فلوز و مدل اصلاحی پرداخته شده است. همه اصلاحات با هم در نظر گرفته شده است. در جدول ۷ مقایسه نتایج مقدار عمق نفوذ پرتابه سرخت بر حسب میلی‌متر، در پشتیبان ضخیم آلومینیوم، در مدل‌های مختلف و در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است.

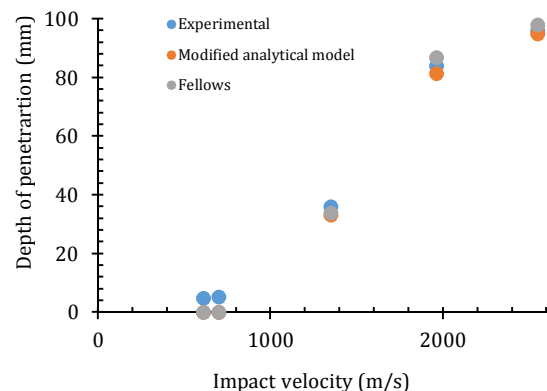
مقایسه پیش‌بینی عمق نفوذ در نمودار ۹ آمده است. در سرعت‌های ۶۱۰ و ۷۰۰ متر بر ثانیه مدل‌های فلوز و وودوارد عمق نفوذی را پیش‌بینی نکرده است. به منظور مقایسه نتایج مدل تحلیلی اصلاحی و مدل تحلیلی فلوز، فرآیند شبیه‌سازی عددی توسعه داده شد. در نمودار ۱۰ دو مدل تحلیلی فلوز و مدل اصلاحی با نتایج عددی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این نمودار از معیار خطای ۱۰٪ برای نتایج عددی استفاده شده است. همان طور که مشخص است مدل تحلیلی اصلاحی در سرعت‌های کمتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه مقادیر عمق نفوذ را بهتر پیش‌بینی کرده است. نتایج تجربی موجود برای این هدف نیز در پنج سرعت موجود است که در نمودار نشان داده شده است.

جدول ۷) مقایسه نتایج عمق نفوذ در مدل اصلاحی و شبیه‌سازی عددی با مدل فلوز<sup>[۳]</sup> و نتایج تجربی<sup>[۲]</sup> (نوع پرتابه برای همه موارد، ۸ گرم تانتالیوم میله‌بلند است)

پارامتر	شماره			
	۴	۳	۲	۱
سرعت پرتابه (m/s)	۶۱۰	۱۳۵۰	۱۹۶۰	۲۵۵۰
اندازه‌گیری تجربی نفوذ در پشتیبان (mm)	۴/۸	۳۶	۸۴	۹۶
ضخامت سرامیک (mm)	۶/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳
پیش‌بینی مدل فلوز از عمق نفوذ در پشتیبان (mm)	۰	۳۳/۸۸۸	۸۶/۸۴۸	۹۷/۸۲۹
پیش‌بینی مدل اصلاحی از عمق نفوذ در پشتیبان (mm)	۵/۱۴۵	۳۶/۵۳۴	۸۵/۷۹۸	۹۷/۵۴۰
پیش‌بینی مدل شبیه‌سازی عددی از عمق نفوذ در پشتیبان (mm)	۳/۲	۳۴/۶۵	۸۵/۶	۹۸/۳

مقادیر عمق نفوذ بین مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح پنجم و مدل فلوز در نمودار ۷ مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، اصلاح فرسایش پرتابه موجب کاهش عمق نفوذ نسبت به مدل فلوز شده است. اصلاح فرسایش پرتابه موجب می‌شود تا در سرعت‌های بالا مقدار طول پرتابه زودتر کاهش یابد و در سرعت‌های پایین زودتر به قارچی تبدیل شود؛ بنابراین عمق نفوذ کاهش یافته است. در سرعت‌های پایین این اصلاح، عمق نفوذ را نسبت به مدل فلوز تغییری نداده است اما در سایر سرعت‌ها موجب بهبود پیش‌بینی عمق نفوذ نشده است.

مقادیر عمق نفوذ بین مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح ششم و مدل فلوز در نمودار ۸ مقایسه شده است. همان طور که مشخص است، اصلاح کاهش جرم پشتیبان موجب کاهش عمق نفوذ نسبت به مدل فلوز شده است. اصلاح کاهش جرم پشتیبان موجب می‌شود تا اختلاف بین سرعت‌های جلوی پشتیبان و سرعت پشتیبان و مقدار جرم کاهش یافته کمتر شود؛ بنابراین عمق نفوذ کاهش یافته است. در سرعت‌های پایین این اصلاح، عمق نفوذ را نسبت به مدل فلوز تغییری نداده است اما در سایر سرعت‌ها به جز سرعت ۱۹۶۰ متر بر ثانیه، موجب بهبود پیش‌بینی عمق نفوذ نشده است.



نمودار ۷) مقایسه مقادیر عمق نفوذ برای مدل اصلاحی با در نظر گرفتن اصلاح پنجم و مدل فلوز

کم خواهد شد اما همین مقدار کم نیز در تعیین عمق نفوذ نهایی تأثیرگذار است. بنابراین در مدل اصلاحی جدید، تغییرات سرعت پرتابه، در هر بازه زمانی در نظر گرفته شده و در حل و تعیین عمق نفوذ در همان مرحله نیز استفاده می‌شود.

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

۵- نیم‌زاویه تشکیل مخروط سرامیکی با افزایش سرعت برخورد پرتابه کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات زاویه در مدل تحلیلی اصلاحی در نظر گرفته شده است. با توجه به تأثیر زاویه تشکیل مخروط سرامیکی در جرم مخروط سرامیکی و سطح مقطع مخروط ناقص در تماس با پشتیبان، خطای فراوانی، حذف می‌شود.

۶- مقاومت سرامیک با توجه به ترد بودن آن و بعد از ضربه، کاهش می‌یابد. در مدل تحلیلی اصلاحی، بعد از برخورد مقاومت سرامیک خرد شده جایگزین مقاومت سرامیک سالم شده است.

۷- 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. تأثیر این تغییر، در نزدیکی نتایج خروجی مدل اصلاحی به نتایج تجربی قابل‌ملاحظه بوده است.

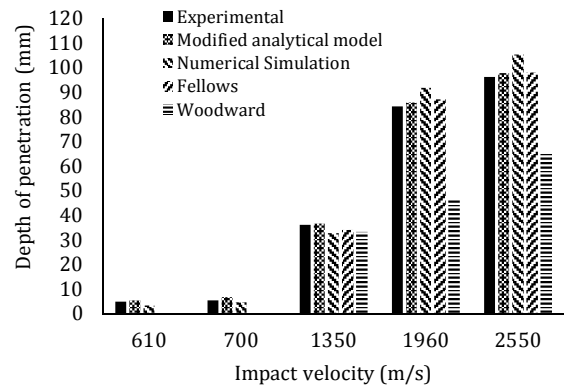
۸- به منظور افزایش دقت مدل تحلیلی باید بازه‌های زمانی مربوط به تحلیل، خیلی کوچک انتخاب شوند. این کوچک انتخاب کردن، مقدار خطاهای مربوط به مدل‌های خطی در نظر گرفته شده در هر بخش را کاهش می‌دهد.

۹- نتایج عددی با نتایج تجربی و نتایج تحلیلی فلوز مطابقت خیلی خوبی داشتند.

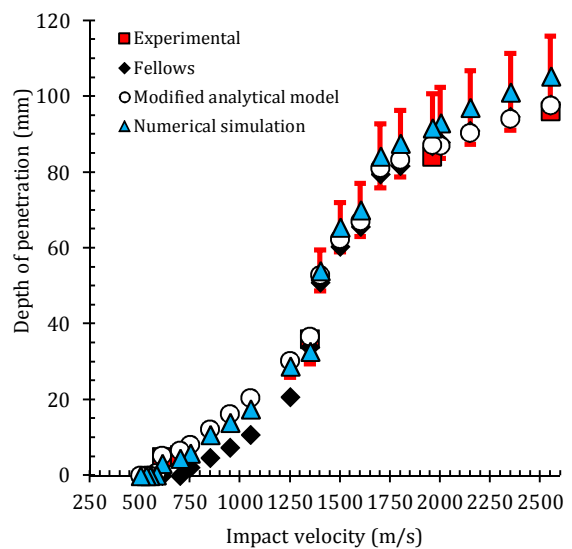
۱۰- با توسعه فرآیند شبیه‌سازی عددی و مقایسه دو مدل تحلیلی فلوز و اصلاحی با نتایج عددی، مشخص شد که مدل اصلاحی در سرعت‌های کمتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه مقادیر عمق نفوذ را بسیار نزدیک‌تر به مقادیر عددی پیش‌بینی کرده است و این نشان‌دهنده دقت بهتر مدل اصلاحی نسبت به مدل فلوز است.

۱۱- اصلاح تغییرات سرعت پرتابه، اصلاح فرسایش پرتابه و اصلاح کاهش جرم پشتیبان موجب کاهش عمق نفوذ و اصلاح نیم‌زاویه مخروط سرامیکی، اصلاح جرم سرامیک و اصلاح مقاومت سرامیک موجب افزایش عمق نفوذ می‌شود.

۱۲- هر کدام از اصلاحات به‌تنهایی، موجب کاهش یا افزایش عمق نفوذ می‌شود و این به معنی بهبود یا عدم بهبود نیست. انجام اصلاحات صورت‌گرفته با توجه به وابسته بودن هر کدام روی دیگری باید در کنار هم بررسی شوند تا موجب بهبود پیش‌بینی عمق نفوذ نسبت به نتایج تجربی و عددی شوند.



نمودار ۹) مقایسه عمق نفوذ بین مدل تحلیلی اصلاحی، مدل فلوز<sup>[3]</sup>، نتایج تجربی<sup>[2]</sup>، مدل وودوارد<sup>[35]</sup> و شبیه‌سازی عددی



نمودار ۱۰) مقایسه مقدار عمق نفوذ در مدل‌های تحلیلی فلوز و اصلاحی با نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی<sup>[2]</sup>

## بررسی نتایج و بحث

در این بخش ضمن بررسی نتایج به بحث در مورد آنها نیز پرداخته شده است.

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

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

۳- فلوز در هر بازه زمانی از یک سرعت پرتابه مشخص استفاده کرده است. با کوچک‌نمودن بازه‌های زمانی، تغییرات سرعت پرتابه،



**سهم نویسندگان:** مصطفی سیاح بادخور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ مهدی آقاملا طهرانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/تحلیلگر آماری (۳۰٪)؛ توحید میرزابابای مستوفی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ علیرضا نداف اسکویی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۱۰٪).

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

### منابع

- 1- Wilkins ML. Mechanics of penetration and perforation. International Journal of Engineering Science. 1978;16(11):793-807.
- 2- Bless SJ, Rosenberg Z, Yoon B. Hypervelocity penetration of ceramics. International Journal of Impact Engineering. 1987;5(1-4):165-171.
- 3- Fellows NA, Barton PC. Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour. International Journal of Impact Engineering. 1999;22(8):793-811.
- 4- Shokrieh MM, Javadpour GH. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. Composite Structures. 2008;82(2):269-276.
- 5- Fawaz Z, Zheng W, Behdinan K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours. Composite Structures. 2004;63(3-4):387-395.
- 6- Baker WE, Westine PS, Dodge FT. Similarity methods in engineering dynamics: Theory and practice of scale modeling. Unknown City: Hayden Book; 1973.
- 7- Khodadadi A, Liaghat G, Akbari MA, Tahmasebi Abdar M. Numerical and experimental analysis of penetration into Kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance. Modares Mechanical Engineering. 2014;13(12):124-133. [Persian]
- 8- Palmer SJP, Field JE, Huntley JM. Deformation, strengths and strains to failure of polymer bonded explosives. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1993;440(1909):399-419.
- 9- 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.
- 10- Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets. International Journal of Impact Engineering. 1999;22(2-3):95-395.
- 11- Børvik T, Clausen AH, Hopperstad OS, Langseth M. Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles-experimental study. International Journal of Impact Engineering. 2004;30(4):367-384.
- 12- Ni C, Hou R, Han B, Jin F, Ma G, Lu TJ. Normal and oblique projectile impact of double-layered pyramidal lattice truss structures filed with ceramic insertions. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2017;30(8):1136-1156.
- 13- Anderson CE, Riegel JP. A penetration model for metallic targets based on experimental data. International Journal of Impact Engineering. 2015;80:24-35.
- 14- Tahmasebiabdar M, Liaghat GH, Shanazari H, Khodadadi A, Hadavinia H, Abotorabi A. Analytical and numerical investigation of projectile perforation into

۱۳- باید توجه داشت که هر کدام از این اصلاحات یک واقعیت پذیرفته‌شده را بیان می‌کنند؛ بنابراین باید در مدل تحلیلی اعمال شوند، هر چند ممکن است اعمال هر کدام به‌تنهایی موجب بهبود نتایج نشود.

### نتیجه‌گیری

به بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف ترکیبی نیمه‌بی‌نهایت سرامیک- فلز پرداخته شد. مدل تحلیلی فلوز به‌علت در نظر گرفتن تمامی شرایط و مراحل نفوذ انتخاب شد. این مدل توانایی پیش‌بینی عمق نفوذ در سرعت‌های پایین را ندارد. بنابراین با اصلاح این مدل ضمن بهبود نتایج در سرعت‌های بالا، مقدار عمق نفوذ در سرعت‌های پایین نیز پیش‌بینی شد. به‌منظور مقایسه بهتر نتایج، فرآیند شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس نیز انجام شد. مشخص شد که مدل تحلیلی اصلاحی جدید در سرعت‌های بالاتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه مقدار عمق نفوذ در اهداف نیمه‌بی‌نهایت را تقریباً مشابه مدل فلوز و با درصد بهبود کمتری نسبت به آن، نزدیک به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند. اما پیش‌بینی دقیق‌تر عمق نفوذ در سرعت‌های کمتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه که مدل فلوز در پیش‌بینی آن دقت پایینی دارد، توسط مدل تحلیلی اصلاحی جدید انجام شده است. بنابراین در سرعت‌های بالاتر از ۱۳۵۰ متر بر ثانیه می‌توان از مدل فلوز و در سرعت‌های کمتر از آن، از مدل تحلیلی اصلاحی جدید استفاده کرد. در صورت نیاز به دقت بالاتر در پیش‌بینی عمق نفوذ می‌توان در تمام سرعت‌ها از مدل تحلیلی اصلاحی جدید استفاده نمود. هر کدام از این اصلاحات به‌تنهایی موجب کاهش، افزایش و در بعضی موارد عدم تغییر مقادیر عمق نفوذ نسبت به مدل فلوز شده است. این اصلاحات به‌تنهایی به‌جز در موارد خاصی موجب بهبود پیش‌بینی عمق نفوذ در مقایسه با نتایج تجربی نسبت به مدل فلوز نشده بودند. هر کدام از این اصلاحات براساس شرایط واقعی در نظر گرفته شده است و اگر به‌تنهایی موجب بهبود عمق نفوذ نشده است نشان از فرض‌هایی در مدل تحلیلی فلوز دارد که با در نظر گرفتن هر کدام از این اصلاحات به‌تنهایی مقادیر عمق نفوذ از نتایج تجربی دورتر شده است. در صورتی که این اصلاحات به‌صورت همزمان در نظر گرفته شوند که با توجه به وابسته‌بودن همه آنها به هم باید به همین صورت در مدل تحلیلی فلوز اعمال شوند، ضمن بهبود نتایج مدل تحلیلی فلوز در همه سرعت‌ها، نقص این مدل را در سرعت‌های پایین نیز برطرف کرده است.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان، مراتب سپاس و قدردانی خود را از مسئولین دانشگاه ایوان‌کی به‌منظور فراهم‌آوردن شرایط مناسب انجام پژوهش، اعلام می‌دارند.

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

**تعارض منافع:** هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص وجود ندارد.

[Persian]

24- Sayahbadkhor M, Vahedi K, 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. [Persian]

25- 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.

26- 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.

27- Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. 19-21 April 1983, Hague, Netherlands. Wuhan: Scientific Research;1983.

28- 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.

29- 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.

30- Johnson GR, Holmquist TJ. An improved computational constitutive model for brittle materials. *AIP Conference Proceedings*. 2008;309(1):1.46199.

31- Nordendale NA. Modeling and simulation of brittle armors under impact and blast effects. Nashville: Vanderbilt University; 2013.

32- Holmquist TJ, Templeton DW, Bishnoi KD. A ceramic armor material database. US: Tacom Research Development and Engineering Center; 1999.

33- Mcintosh G. The Johnson-Holmquist ceramic model as used in LS-DYNA2D [dissertation]. Ottawa: Defence Research and Development Canada; 1998.

34- Westerling L. Interaction of cylindrical penetrators with ceramic and electromagnetic armour [dissertation]. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis; 2013.

35- Woodward RL. A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *International Journal of Impact Engineering*. 1990;9(4):455-474.

ceramic-metal targets and presenting a modified theory. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(9):353-359. [Persian]

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

16- Mirzababaei Mostofi T, 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.

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

18- Li JC, Chen XW. Theoretical analysis of projectile-target interface defeat and transition to penetration by long rods due to oblique impacts of ceramic targets. *International Journal of Impact Engineering*. 2017;106:53-63.

19- Bresciani LM, Manes A, Giglio M. An analytical model for ballistic impacts against ceramic tiles. *Ceramics International*. 2018;44(17):21249-21261.

20- Bavdekar S, Subhash G, Satapathy S. A unified model for dwell and penetration during long rod impact on thick ceramic targets. *International Journal of Impact Engineering*. 2019;131:304-316.

21- Sayahbadkhor M, Vahedi k, Naddaf Oskouei AR. Presenting a modified theory and analytical investigation of projectile penetration into ceramic-metal semi-infinite targets. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019;9(2):31-45. [Persian]

22- Sayahbadkhor M, Naddaf Oskouei AR, Vahedi K. Evaluation of the projectile penetration models in the metal and ceramic targets. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019;9(4):77-92. [Persian]

23- Sayah-Badkhor M, Naddaf-Oskouei A, Kashani D, Agha Mola Tehrani M. Experimental and numerical investigation of ballistic impact on ceramic-metal combined targets with different nosed projectiles. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(3):677-687.