



## بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک-فلز و ارائه یک مدل اصلاحی

مهدی طهماسبی آبدر<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2\*</sup>، هادی شانزتری<sup>3</sup>، امین خدادادی<sup>3</sup>، همایون هادوی نیا<sup>4</sup>، اکبر ابوترابی<sup>4</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کینگزتون لندن، انگلیس

\*تهران، صندوق پستی 141-14115، ghlia530@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 اسفند 1393

پذیرش: 01 مرداد 1394

ارائه در سایت: 31 مرداد 1394

کلید واژگان:

نفوذ

اهداف سرامیکی

حد بالستیک

مدل وودوارد

شبیه سازی عددی

### چکیده

سرامیک‌ها به علت سختی بالا و چگالی پایین و مقاومت گرمایی بالا، به‌طور وسیعی در کاربردهای زرهی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این‌رو در این مقاله، پدیده نفوذ پرتابه در اهداف سرامیکی به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفته و یک مدل اصلاحی جدید ارائه شده است. در بخش تحلیلی، تئوری وودوارد که یکی از تئوری‌های مهم در زمینه نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک-فلز می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته و با اعمال اصلاحاتی در مدل مذکور نتایج بالستیک بهبود یافته‌اند و با نتایج تجربی هم‌خوانی خوبی دارند که در بخش تحلیلی، مدل اصلاحی جدید ارائه شده که در آن اصلاحاتی از جمله تغییر نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی، سایش، قارچی شدن و صلیبیت پرتابه و همچنین تغییرات مقاومت فشاری سرامیک در طول فرایند نفوذ تحت عنوان خرابی، لحاظ شده است. در بخش عددی، یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینا ایجاد و پدیده نفوذ پرتابه در هدف سرامیک-آلومینیوم شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصل از روش تحلیلی و عددی با نتایج دیگر محققین مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج مدل اصلاحی در پیش‌بینی نتایج بالستیک، بهبود قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

## Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting a modified theory

Mahdi Tahmasebiabdar<sup>1</sup>, Gholamhossein Liaghat<sup>1\*</sup>, Hadi Shanazari<sup>1</sup>, Amin Khodadadi<sup>1</sup>, Homayoun Hadavinia<sup>2</sup>, Akbar Aboutorabi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Kingston University, London, England

\*P. O. B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 March 2015  
Accepted 23 July 2015  
Available Online 22 August 2015

**Keywords:**  
Penetration  
ceramic targets  
ballistic limit  
Woodward's model  
numerical simulation

### ABSTRACT

Due to high hardness, low density and heat resistance, ceramics are widely used in armor applications and industry, thus, in this study perforation process of projectile into ceramic targets is investigated analytically and numerically and a modified model is developed. In the analytical section, Woodward's theory, one of the important theories in perforation process of projectile into ceramic targets, is investigated and some modifications are applied in Woodward's model, hence the ballistic results of analytical method are improved and the modified model shows good agreement with the experimental results. However, in the analytical section, the modified model is based on Woodward's model and modification of semi-angle of ceramic fracture cone, erosion, mushrooming and rigid form of projectile and also changes in yield strength of ceramic during perforation process, damage is considered. In the numerical section, a finite element model is created using Ls-Dyna software and perforation process of projectile into Ceramic-Aluminum target is simulated. The results of the analytical method and numerical simulation are compared to the results of the other investigators and results of modified model show improvement in prediction of ballistic results.

### 1- مقدمه

ناحیه وسیعی از ماده پستی پخش می‌کند و از نفوذ پرتابه در صفحه پستی جلوگیری می‌کند.

مواد سرامیکی متفاوتی برای کاربردهای بالستیک استفاده می‌شود. سرامیک‌ها به دو دسته سرامیک‌های اکسیدی مانند آلومینا و یا غیر اکسیدی مانند نیتريد آلومینیوم، کربید سیلیسیم، کربید برم و ... تقسیم می‌شوند. معمولاً آلومینا علی‌رغم چگالی بالا، با داشتن سختی بالا و همچنین سهولت

سرامیک‌ها به‌علت سختی بالا و چگالی پایین به‌طور وسیعی در سیستم‌های زرهی از جمله خودروهای ضد گلوله، بدنه هواپیماها و هلی‌کوپترها و همچنین در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرامیک‌ها به عنوان صفحه جلویی در اهداف مرکب سرامیکی به کار برده می‌شود.

نقش اصلی سرامیک سایش پرتابه می‌باشد و بار ناشی از ضربه را روی

Please cite this article using:

M. Tahmasebiabdar, Gh. Liaghat, H. Shanazari, A. Khodadadi, H. Hadavinia, A. Aboutorabi, Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting a modified theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 353-359, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

زمانی، سرعت پرتابه، سرامیک و هدف، جرم پرتابه و نیروهای سطح مشترک به دست می‌آید [3]:

$$F_P = -M_P \ddot{U}_P \quad (1-الف)$$

$$F_I - F_P = -M_P \frac{\dot{U}}{\Delta t} \quad (1-ب)$$

$$F_C - F_I = -M_C \frac{\dot{U}_C}{\Delta t} \quad (1-ج)$$

$$F_T - F_C = -M_T \ddot{U}_T \quad (1-د)$$

که با توجه به شکل 1، کاهش در جرم پرتابه و سرامیک در هر بازه زمانی از رابطه (2) خواهد شد:

$$\frac{\Delta M_P}{\rho_P A_0} = -[\dot{U}_P - \dot{U}_C] \Delta t \quad (2-الف)$$

$$\frac{\Delta M_C}{\rho_C A_0} = -[\dot{U}_C - \dot{U}_T] \Delta t \quad (2-ب)$$

در برخورد پرتابه به هدف، اگر نیروهای ایجاد شده در سطح مشترک از نیروی لازم برای سایش پرتابه و یا سرامیک بیشتر باشد آنگاه فرسایش اتفاق می‌افتد؛ که نیروی لازم برای فرسایش پرتابه از رابطه (3-الف) و برای فرسایش سرامیک از رابطه (3-ب) به دست خواهد آمد:

$$F_P = Y_P A_0 \quad (3-الف)$$

$$F_C = Y_C A_0 \quad (3-ب)$$

در مدل تحلیلی وودوارد، کار لازم برای بشقابی شدن صفحه پشتی از رابطه (4) به دست خواهد آمد:

$$W = \pi Y_T b h \left[ \frac{2}{3} b + \frac{h}{2} \right] \quad (4)$$

و در نتیجه نیروی لازم برای بشقابی شدن صفحه پشتی با دیفرانسیل گیری از رابطه (4)، به صورت رابطه (5) خواهد شد:

$$F_T = \pi b Y_T \left[ \frac{2}{3} b + h \right] \quad (5)$$

برای بررسی شکست ماده پشتی، انرژی جنبشی مؤثر باید با کار انجام شده (رابطه 4) برابر باشد که از رابطه (6) خواهد شد؛

$$E_K = \frac{1}{2} M_P U_P^2 + \frac{\pi}{8} \left[ \frac{\rho_C t_c}{5} + \frac{\rho_B b}{3} \right] \frac{d_P^4 U_P^2}{(d_T - d_P)^2} \quad (6)$$

طرح کلی روش جرم خرد شده در شکل 1، نشان داده شده است.

اگر سرامیک به طور کامل فرسایش پیدا کرده باشد از رابطه (7) می‌توان

$$\frac{1}{2} [\dot{U}_B - \dot{U}_P]^2 M_P = \frac{\pi d_P^2 b Y_T}{2} \quad (7)$$

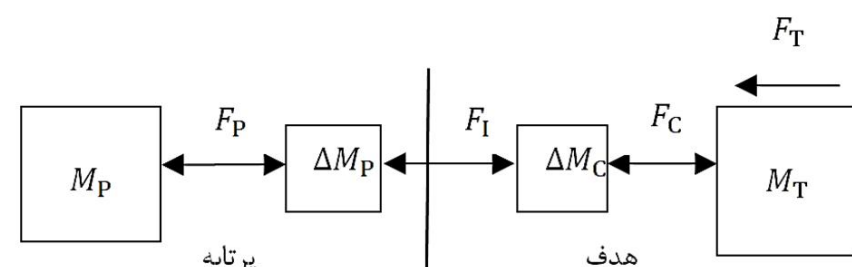
نفوذ کامل در ماده پشتی را بررسی کرد.

### 3- مدل تحلیلی (اصلاحات اعمال شده در مدل وودوارد)

در مدل تحلیلی مذکور، اصلاحاتی در جهت بهبود نتایج بالستیک اعمال شده است که در این قسمت ارائه شده اند.

#### 3-1- اعمال فازهای مختلف برای پرتابه

در مدل وودوارد، تنها فرسایش پرتابه در نظر گرفته شده است ولی پرتابه در فرایند نفوذ، سه رفتار متفاوت از خود نشان می‌دهد. در ابتدا در سرعت‌های بالا، فشار ایجاد شده در سطح مشترک پرتابه-سرامیک زیاد بوده و این نیروی



شکل 1 طرح کلی روش جرم خرد شده

ساخت، در تجهیزات مقاوم به نفوذ و ضربه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اهداف مرکب سرامیکی، ماده پشتی مورد استفاده می‌تواند فلز یا ماده کامپوزیتی باشد که با توجه به نوع کاربرد، شرایط بالستیک، وزن و ... انتخاب می‌شود. معمولاً از آلومینیوم، فایبر گلاس، کولار و ... به عنوان ماده پشتی استفاده می‌شود. یک زره سرامیکی ایده‌آل باید از مقاومت به نفوذ بالا، چگالی کم و در مواقعی از انعطاف پذیری بالایی برخوردار بوده و همچنین به راحتی قابل ساخت باشد.

برای بررسی پدیده نفوذ در اهداف سرامیکی فعالیت‌های زیادی صورت گرفته که هر کدام از این فعالیت‌ها گامی مهم در بهبود بررسی هدف‌های سرامیکی می‌باشد. این اهداف با سه روش تحلیلی، تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هر روش دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد.

در سال 1967، تیت [1] یک مدل برای بررسی نفوذ پرتابه‌های میله‌ای در اهداف سرامیکی ضخیم ارائه نمود. در سال 1967، فلورانس [2] مدل تحلیلی ارائه داد که این مدل براساس تعادل انرژی می‌باشد، حد بالستیک را در اهداف سرامیکی بررسی می‌کند. در مدل تحلیلی وودوارد [3] که در سال 1990 ارائه شد پدیده نفوذ در اهداف سرامیکی با روش جرم خرد شده<sup>1</sup> بررسی شده و با ارائه روابطی، سرعت و جرم پرتابه، سرامیک و ماده هدف در هر بازه‌ی زمانی محاسبه می‌گردد.

در سال 1991، یک مدل تحلیلی توسط دن ریچر [4] ارائه شد که براساس مدل وودوارد بوده و یک سری معادلات دیفرانسیلی ارائه شده که پدیده نفوذ در اهداف سرامیکی را بررسی کرد و در سال 1997، چکرن و گالوز [5] مدلی ارائه دادند که هدف سرامیکی با ماده کامپوزیت کولار-اپوکسی به عنوان صفحه پشتی بررسی شد و سرعت و جرم باقی‌مانده پرتابه و تغییر مکان و کرنش ماده پشتی مورد محاسبه قرار گرفت.

در سال 1998، زائرا و سنچز [6] یک مدل تحلیلی ارائه دادند که ضربه بالستیک پرتابه به هدف سرامیک-فلز شبیه‌سازی شد. در این مدل، رفتار پرتابه براساس مدل تیت و رفتار ماده پشتی براساس مدل وودوارد بوده و سرعت و جرم باقی‌مانده پرتابه و سرعت حد بالستیک محاسبه شد. در سال 1999، فلوز [7] یک مدل تحلیلی برای اهداف نیمه بی‌نهایت ارائه داد که اساس آن روش جرم خرد شده بوده و به نوعی ادامه کار وودوارد است.

در سال 2004، شانظری مدل وودوارد را بررسی و با لحاظ اصلاحاتی در مدل مذکور نتایج حد بالستیک را بهبود بخشید [8]. در سال 2010، فعلی [9] یک مدل تحلیلی ارائه داد که براساس مدل زائرا و سنچز بوده و با یک سری از معادلات مومنتوم، رفتار شکست مخروطی سرامیک را توصیف کرد و در سال 2012، علیزاده [10] پدیده نفوذ در اهداف سرامیک-فلز را به صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار داد. در سال 2013، طهماسبی و لیاقت [11] پدیده نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم را به صورت تحلیلی، تجربی و عددی بررسی کرده و مدل وودوارد را مورد اصلاح قرار دادند. در این مقاله، مدل تحلیلی وودوارد [3] بررسی شده و با اعمال اصلاحاتی جدید در مدل مذکور، نتایج حد بالستیک بهبود یافته‌اند و با نتایج تجربی هم‌خوانی خوبی دارند. ازین‌رو، مدل اصلاحی جدید برای پیش‌بینی نتایج حد بالستیک و جلوگیری از انجام تست‌های گران و زمانبر تجربی، ضرورت دارد.

### 2- مدل تحلیلی وودوارد

مدل اصلاح شده در این مقاله براساس مدل وودوارد است. مدل مذکور براساس روش جرم خرد شده است که با استفاده از رابطه (1) در هر بازه‌ی

1- Lumped Mass

ایجاد شده در سطح مشترک از نیروی لازم برای فرسایش پرتابه بیشتر بوده و باعث فرسایش پرتابه می‌شود؛ ازین‌رو در فاز فرسایش پرتابه، نیروی سطح مشترک از رابطه (8) خواهد شد [3]:

$$F_I = \rho_P A_0 [\dot{U}_P - \dot{U}_C]^2 + F_P \quad (8)$$

در ادامه فرایند، با کاهش سرعت پرتابه و رسیدن سرعت نسبی ضربه (اختلاف سرعت پرتابه و سرامیک) به زیر سرعت امواج پلاستیک، پرتابه وارد فاز قارچی شدن می‌شود و نیروی سطح مشترک پرتابه-سرامیک از رابطه (9) خواهد شد [7]:

$$F_I = \rho_P A_0 [u_{\text{plas}} [\dot{U}_P - \dot{U}_C] - \ddot{U}_P (L_{\text{ERO}} - L_{\text{ELAS}})] + F_P \quad (9)$$

در ادامه، با کاهش سرعت پرتابه، رفتار پرتابه به صورت صلب فرض می‌گردد؛ در این حالت نیروی سطح مشترک سرامیک-پرتابه از رابطه (10) خواهد شد [7]:

$$F_I = -\ddot{U}_P \rho_P L_{\text{ERO}} A_0 \quad (10)$$

بنابراین علاوه بر فاز فرسایش، فاز قارچی شدن و صلبیت پرتابه در مدل وودوارد لحاظ شده است.

### 2-3- اصلاح نیم زاویه مخروط سرامیکی

2-2-3- تغییرات نیم زاویه مخروط سرامیکی بر حسب سرعت ورودی پرتابه  
در برخورد پرتابه به سرامیک، یک مخروط سرامیکی ناقص تشکیل می‌شود که در تئوری‌های مختلف این نیم زاویه مخروط سرامیکی متفاوت می‌باشد؛ برای نمونه، در مدل فلورانس این نیم زاویه مخروط سرامیکی برابر با 63 درجه و در مدل وودوارد برابر با 68 درجه در نظر گرفته شده است؛ اما در واقعیت با افزایش سرعت برخورد پرتابه، این نیم زاویه مخروط سرامیکی کاهش می‌یابد که در شکل 2، تغییرات نیم‌زاویه مخروط سرامیکی نشان داده شده است. با توجه به شکل 2، با برخورد پرتابه به هدف سرامیک-آلومینیوم، نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی در ضربه با سرعت‌های پایین در مقایسه با ضربه در سرعت‌های بالا، بیشتر می‌باشد.

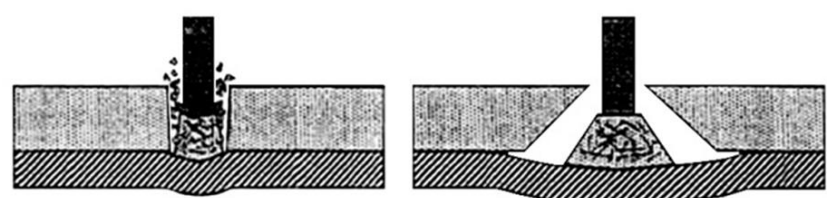
ازین‌رو در اولین اصلاح، این نیم‌زاویه مخروط سرامیکی به صورت یک تقریب خطی بین 63° و 68° به فرم (11) در نظر گرفته شده است:

$$\varphi = \frac{\pi}{180} \left\{ \frac{5}{300} [-\dot{U}_P + 900] + 63 \right\} \quad (11)$$

که برای سرعت‌های بالای 900m/s نیم زاویه مخروط سرامیکی برابر با 63° و برای سرعت‌های کمتر از 600m/s این نیم زاویه مخروط سرامیکی برابر با 68° و بین این مقادیر به صورت خطی (رابطه 11) تغییر می‌کند.

### 2-2-3- تغییرات نیم زاویه شکست مخروطی سرامیکی بر حسب فرسایش سرامیک

در بخش دوم، نیم زاویه مخروط سرامیکی بر حسب فرسایش سرامیک اصلاح شده است (رابطه 12)؛ بدین گونه که برای فرسایش کامل سرامیک، نیم زاویه مخروط سرامیکی برابر با 34° (حداقل مقدار در مدل فلوز) و در صورت عدم ضربه سرعت پایین ضربه سرعت بالا



شکل 2 تغییرات نیم‌زاویه شکست مخروط سرامیکی در سرعت‌های مختلف [12]

فرسایش سرامیک برابر با ماکزیمم مقدار خود (رابطه 11) می‌باشد:

$$\varphi = \frac{\pi}{180} \left[ \frac{\varphi_0}{t_c} (t_c - x) + 34 \right] \quad (12)$$

بنابراین در ابتدا، نیم زاویه مخروط سرامیکی با سرعت ورودی پرتابه از رابطه (11) به دست آمده و با جای‌گذاری در رابطه (12) بر حسب فرسایش سرامیک تغییر خواهد کرد. با تغییرات نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی، حجم سرامیک خردشده در زیر پرتابه و یا به عبارتی دیگر جرم سرامیک خردشده تغییر می‌کند.

### 3-3- اصلاح مقاومت فشاری سرامیک

در مرحله بعدی، مقاومت فشاری سرامیک اصلاح شده است. در مدل وودوارد مقاومت فشاری سرامیک در طول فرایند ثابت است؛ اما در واقعیت، زمانی که سرامیک در اثر برخورد پرتابه خرد می‌شود مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد. در واقع در لحظه برخورد پرتابه به سرامیک، مقاومت فشاری سرامیک برابر با مقدار ماکزیمم مقدار خود (مقدار اولیه) بوده و با ادامه فرایند نفوذ، سرامیک خرد شده و مقاومت فشاری آن کاهش می‌یابد. تغییرات مقاومت فشاری سرامیک از رابطه (13) خواهد شد [13]:

$$Y_C = Y_{C0} \left[ \frac{u-w}{u_{\text{phase}}} \right]^2 \quad (13)$$

در فرایند نفوذ پرتابه به هدف سرامیکی، فاز اول زمانی است که نیم مخروط سرامیکی تشکیل می‌شود. رابطه (13) با استفاده از معادلات تعادل مدل تیت [1] به دست آمده است و در رابطه مذکور با افزایش سرعت نفوذ پرتابه، مقاومت فشاری سرامیک کاهش می‌یابد.

با اعمال اصلاحات مذکور (روابط 8-13) در روابط مدل وودوارد [3] (روابط 1-7)، در هر بازه زمانی، سرعت و جرم پرتابه، هدف و سرامیک، نیروهای سطح مشترک، انرژی لازم برای بشقابی شدن صفحه پشتی و انرژی جنبشی موثر بدست خواهد آمد. برای بدست آوردن سرعت حد بالستیک باید انرژی لازم برای بشقابی شدن صفحه پشتی با انرژی جنبشی موثر برابر شود (برابری روابط 4 و 6) و برای زمانی که سرامیک کاملاً فرسایش پیدا کرده است باید رابطه (7) برقرار باشد.

### 4- بخش عددی

از آنجا که تعداد متغیرهای موجود در عملکرد بالستیکی هدف زیاد است و انجام آزمایش‌های بالستیک نیاز به هزینه و زمان زیادی دارد، بنابراین انجام آن‌ها دارای محدودیت‌های زیادی است. به عنوان مثال زمانی که هدف بدست آوردن حد بالستیک است انجام آزمایش‌های مکرر با سعی و خطا، اجتناب‌ناپذیر است. با پیشرفت نرم‌افزارهای تحلیل عددی، استفاده از آن‌ها باعث کاهش هزینه و زمان گردیده و نتایج قابل قبول و مطمئنی حاصل خواهد شد. بنابراین به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد بالستیکی اهداف مرکب از سرامیک و آلومینیوم، یک مدل المان محدود ایجاد گردید. بدین منظور برای طراحی هدف و پرتابه از نرم‌افزار کتیا<sup>1</sup> استفاده شده است. در این نرم‌افزار صفحه سرامیکی، صفحه آلومینیومی و پرتابه به صورت مجزا مدل شده و در فاصله مناسب از همدیگر قرار می‌گیرند.

در این مدل‌سازی، صفحه آلومینیومی و سرامیکی با ابعاد 5×5 سانتی‌متر با ضخامت‌های متفاوت مدل‌سازی می‌گردند. پرتابه که به شکل استوانه سرتخت طراحی شده، از جنس فولاد بوده که قطر آن 7/62 میلی‌متر و جرم آن 8/3 گرم می‌باشد (مطابق با تست تجربی ویلکینز).

سرامیکی و آلومینیومی نیز به دلیل عدم نفوذ آن‌ها در یکدیگر به صورت تماس اتوماتیک تعریف شده است.

## 5- نتایج و بحث

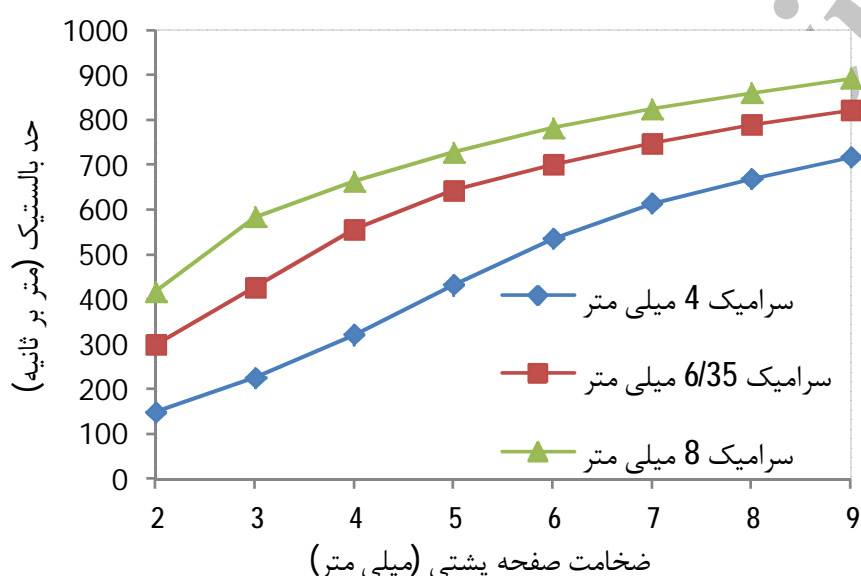
در این بخش، نتایج مدل اصلاحی و حل عددی مورد بحث قرار گرفته و با نتایج دیگر تئوری‌ها مقایسه شده اند.

در شکل 3، حد بالستیک مدل اصلاحی جدید برای ضخامت‌های مختلف سرامیک و ماده پستی نشان داده شده است.

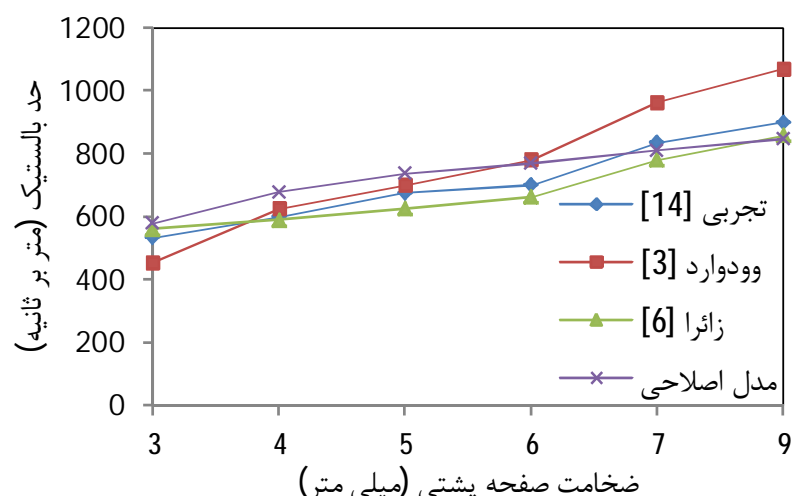
همان‌طور که در شکل 3 دیده می‌شود با افزایش ضخامت ماده پستی در ضخامت ثابت سرامیک، حد بالستیک افزایش پیدا می‌کند؛ در واقع با افزایش ضخامت ماده پستی انرژی لازم برای خمش و کشش ماده پستی افزایش پیدا می‌کند؛ که این مستلزم افزایش سرعت پرتابه یا به عبارتی افزایش حد بالستیک است؛ از طرف دیگر نیز برای ضخامت ثابت صفحه پستی آلومینیومی و با افزایش ضخامت سرامیک آلومینا از 4 میلی‌متر تا 8 میلی‌متر، سرعت حد بالستیک افزایش پیدا می‌کند.

در شکل 4، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی جدید با نتایج تجربی ویلکینز [14]، مدل تحلیلی وودوارد [3] و زائرا- سنچز [6] مقایسه شده است.

با توجه به شکل 4، خطای مدل اصلاحی در مقایسه با دیگر مدل‌ها کمتر بوده و به نتایج تجربی ویلکینز [14] نزدیک‌تر است. همان‌طور که دیده می‌شود نمودار مدل اصلاحی با اختلاف کمی نمودار مربوط به نتایج تجربی را دنبال می‌کند. با توجه به شکل 4، برای ضخامت‌های کمتر از 6 میلی‌متر برای ماده پستی، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی در مقایسه با نتایج تجربی بیشتر است و با اصلاح مقاومت فشاری سرامیک مقدار حد بالستیک کاهش



شکل 3 مقادیر حد بالستیک در ضخامت‌های مختلف هدف (روش تحلیلی)



شکل 4 مقایسه حد بالستیک مدل اصلاحی با مدل‌های دیگر

پس از مدل‌سازی، هدف و پرتابه در نرم‌افزار ال‌اس‌دایناسیو شبیه‌سازی می‌شوند. برای تعیین نوع المان می‌توان از دو المان جامد<sup>1</sup> یا المان پوسته<sup>2</sup> استفاده نمود. چون هدف متشکل از چند لایه بوده و گاه چند لایه با ضخامت زیاد ایجاد می‌شود، المان پوسته کارایی خود را از دست می‌دهد و معمولاً از المان جامد با تنش ثابت استفاده می‌گردد. در مدل‌سازی انجام شده، از المان‌های جامد برای صفحه سرامیکی، آلومینیومی و همین‌طور برای پرتابه استفاده شده است.

مدل ماده‌ای که برای صفحه آلومینیومی در نظر گرفته شده است، مدل ماده الاستیک پلاستیک<sup>3</sup> است که هم دارای معیار شکست براساس کرنش و هم دارای معیار شکست براساس تنش می‌باشد. از این مدل ماده برای پرتابه نیز استفاده شده است. مدل ماده مورد استفاده برای سرامیک نیز مدل ماده جانسون-هلمکوئیست<sup>4</sup> می‌باشد.

در مش‌بندی انجام شده، صفحه پستی آلومینیومی دارای 1875 المان و 2704 گره و صفحه جلویی (سرامیک آلومینا) دارای 2352 المان و 3364 گره و گلوله استوانه‌ای فولادی دارای 12312 المان و 13695 گره می‌باشد. مش‌بندی انجام شده دارای دقت بالایی در نتایج حد بالستیک بوده که در بخش نتایج و بحث پس از برخورد پرتابه نشان داده شده است. در جدول 1، خواص مکانیکی آلومینیوم، سرامیک آلومینا و فولاد آورده شده است.

همان‌طور که ذکر گردید از مدل ماده جانسون-هلمکوئیست برای بررسی رفتار سرامیک آلومینا در شبیه‌سازی عددی استفاده شده است که در جدول 2، ثابت‌های مورد نیاز مدل ماده جانسون-هلمکوئیست آورده شده است. در این تحلیل، دو نوع تماس وجود دارد. یک تماس بین پرتابه و هدف مرکب از سرامیک و آلومینیوم و دیگری تماس بین صفحه سرامیکی با صفحه آلومینیومی می‌باشد. عمومی‌ترین نوع تماس، تعریف تماس اتوماتیک<sup>5</sup> می‌باشد. در کنار این نوع تماس، تماس فرسایشی<sup>6</sup> نیز وجود دارد. مشکلی که تماس اتوماتیک برای المان‌های جامد دارد این است که پرتابه از هدف عبور می‌کند ولی المان‌هایی که به تنش و کرنش نهایی می‌رسند از تحلیل حذف نمی‌شوند. اما با استفاده از تماس فرسایشی این مشکل حل می‌شود. در ضربه پرتابه روی هدف، تماس بین پرتابه و مجموعه سرامیک و آلومینیوم به صورت تماس سه‌بعدی از نوع تماس فرسایشی تعریف شده است؛ که دلیل انتخاب این نوع تماس، نفوذ پرتابه درون هدف و حذف المان‌ها می‌باشد. انرژی جنبشی پرتابه با حذف المان‌های آن کاهش می‌یابد. تماس بین صفحه

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم، سرامیک و فولاد [10].

نوع ماده	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)
فولاد	7850	207	1069
آلومینیوم	2700	68/3	240
سرامیک	38000-3880	350	2108

جدول 2 ثابت‌های مدل ماده جانسون-هلمکوئیست برای سرامیک [11].

A	B	C	N	M	D1	D2
0/93	0/31	0/007	0/6	0/6	0/005	1

- 1- Solid Element
- 2- Shell Element
- 3- Elastic-Plastic
- 4- Johnson-Holmquist-Ceramics
- 5- Contact Automatic Surface to Surface
- 6- Contact Eroding Surface to Surface



بوده و این کاهش حد بالستیک به علت کاهش مقاومت فشاری سرامیک در طی فرایند نفوذ می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 6 دیده می‌شود در ضخامت‌های پایین، این مقدار اختلاف حد بالستیک در دو حالت، کمتر بوده و با افزایش ضخامت ماده پستی این اختلاف حد بالستیک بیشتر می‌شود.

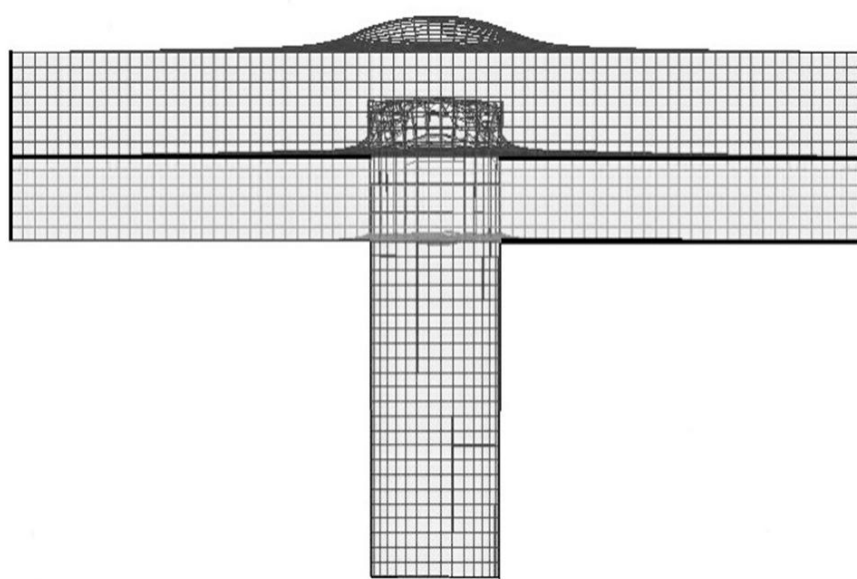
همان‌طور که ذکر شد در ضخامت‌های بالاتر و یا به عبارتی در سرعت‌های بالاتر برای حد بالستیک، شدت کاهش مقاومت فشاری سرامیک بیشتر بوده و در نتیجه مقدار حد بالستیک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در شکل 7، فرایند نفوذ در هدف سرامیک-آلومینیوم در نرم افزار ال اس داینا شبیه‌سازی شده که پرتابه و هدف را پس از برخورد نشان می‌دهد.

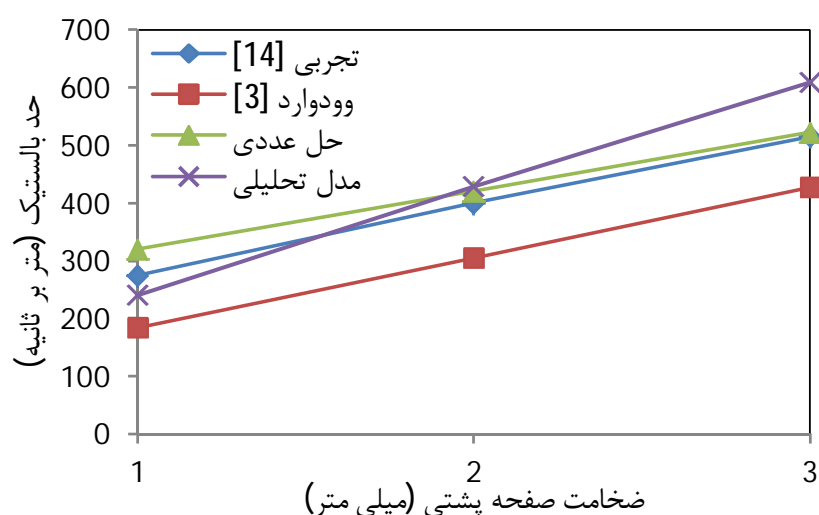
در شکل 8، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی، حل عددی، تجربی ویلکینز [14] و مدل وودوارد [3] برای سرامیک با ضخامت 4/06 میلی‌متر و در ضخامت‌های مختلف صفحه پستی آلومینیومی نشان داده شده است.

با توجه به شکل 8، همان‌طور که دیده می‌شود در مقایسه روش عددی و روش تحلیلی (مدل اصلاحی)، در ضخامت‌های پایین، مقادیر نزدیک هم بوده و با افزایش ضخامت صفحه پستی آلومینیومی (بیش از 6 میلی‌متر)، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی از نتایج تجربی ویلکینز [14] بیشتر شده است. مقدار نتایج بالستیک حل عددی با افزایش ضخامت صفحه پستی افزایش یافته ولی از نتایج مدل اصلاحی کمتر شده و به مقادیر حد بالستیک تجربی [14] نزدیک‌تر شده و هم‌خوانی خوبی با نتایج تجربی دارد.

در شکل 9، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی، حل عددی، تجربی ویلکینز [14] و مدل وودوارد [3] برای سرامیک با ضخامت 8/64 میلی‌متر و



شکل 7 شبیه سازی نفوذ پرتابه در هدف سرامیک-آلومینیوم پس از برخورد با نرم‌افزار ال اس داینا



شکل 8 مقایسه حد بالستیک (ضخامت سرامیک 4/06 میلی‌متر)

می‌یابد و علت این‌است که با لحاظ این اصلاح، مقاومت فشاری سرامیک در طول فرایند کاهش پیدا کرده و در نتیجه مقدار حد بالستیک کمتر می‌شود و در ضخامت‌های پایین به مقادیر تجربی ویلکینز [14] نزدیک‌تر می‌شود.

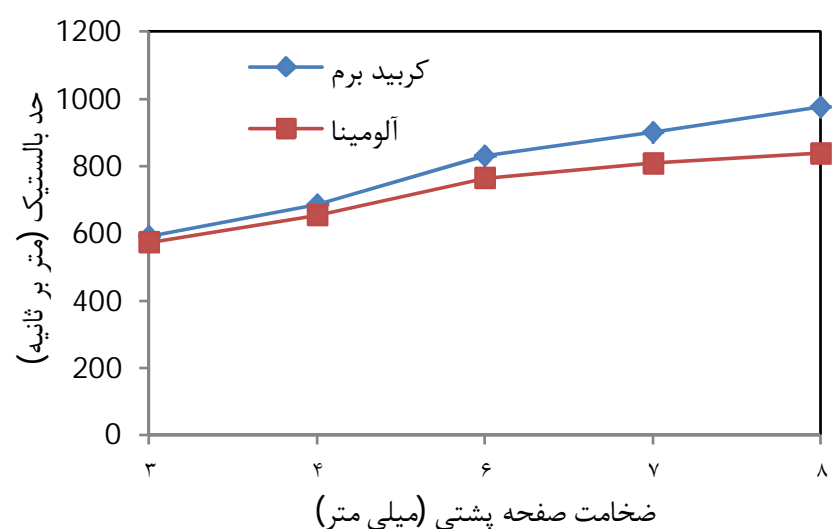
در ضخامت‌های بالای هدف، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی از مقادیر تجربی کمتر شده است؛ علت این‌است که در ضخامت‌های بالا، سرعت لازم برای حد بالستیک بیشتر شده و از طرفی در سرعت‌های بالا با توجه به مرجع [13] مقدار مقاومت فشاری سرامیک با شدت بیشتری کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه با کاهش شدید مقاومت فشاری سرامیک در سرعت‌های بالا، مقدار حد بالستیک کاهش بیشتری دارد.

نتایج مدل اصلاحی برای ضخامت‌های کمتر از 6 میلی‌متر (شکل 4) در مقایسه با مدل وودوارد [3] از دقت خوبی برخوردار است. برای نمونه، مقدار خطای نتایج مدل وودوارد [3] نسبت به نتایج تجربی ویلکینز [14] برای ضخامت‌های 3/17 و 5 میلی‌متر به ترتیب برابر با 32 و 23 درصد بوده ولی در مدل اصلاحی جدید، مقدار این خطاها به ترتیب 12/01 و 7 درصد می‌باشد.

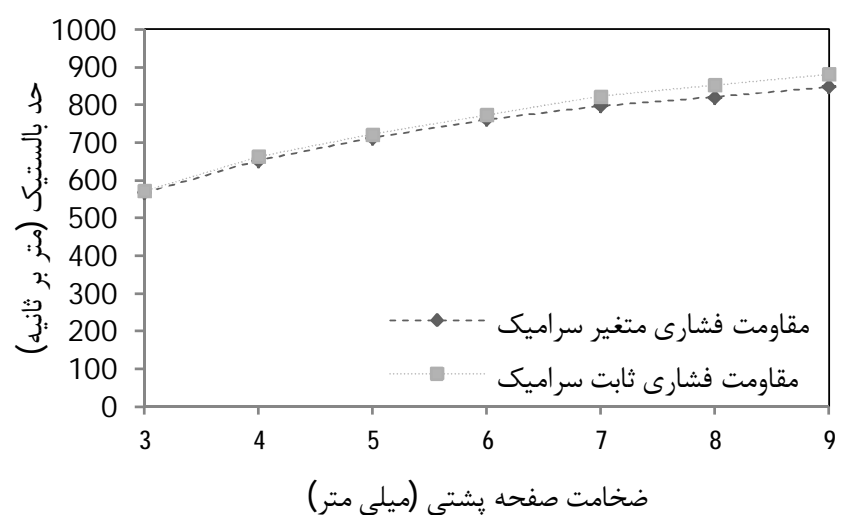
در شکل 5، مقدار حد بالستیک برای سرامیک آلومینا و کربید برم و در شکل 6، مقدار حد بالستیک برای سرامیک آلومینا با مقاومت فشاری ثابت و متغیر (مدل اصلاحی)، نشان داده شده است.

با توجه به شکل 5، از دیگر پارامترهای موثر در حد بالستیک، جنس یا سختی سرامیک می‌باشد که به‌عنوان صفحه جلویی در اهداف سرامیکی استفاده می‌شود. مقدار حد بالستیک برای سرامیک کربید برم در مقایسه با سرامیک آلومینا بیشتر بوده و علت آن هم سختی بالای سرامیک کربید برم در مقایسه با سرامیک آلومینا است.

با توجه به شکل 6، مقادیر حد بالستیک برای مقاومت فشاری ثابت سرامیک در مقایسه با زمانی که مقاومت فشاری سرامیک متغیر است بیشتر



شکل 5 مقایسه حد بالستیک در دو سرامیک مختلف



شکل 6 مقایسه حد بالستیک برای سرامیک با مقاومت فشاری ثابت و متغیر

اصلاح تغییرات نیم زاویه شکست مخروط سرامیکی و هم‌چنین اصلاح مقاومت فشاری سرامیک، نتایج مدل اصلاحی به نتایج تجربی نزدیک‌تر شده است.

با افزایش سختی سرامیک حد بالستیک افزایش یافته و با اعمال تغییرات مقاومت فشاری سرامیک حد بالستیک کاهش یافته و در ضخامت‌های پایین هدف با نتایج تجربی هم‌خوانی خوبی دارد.

در بخش عددی در ضخامت‌های پایین سرامیک و آلومینیوم، مقادیر حد بالستیک از دو روش تحلیلی و عددی دارای خطای کمتری می‌باشند.

در ضخامت‌های بالای صفحه آلومینیومی، مقادیر حد بالستیک در روش عددی به مقادیر روش تجربی نزدیک‌تر شده و نسبت به مقادیر روش تحلیلی کمی اختلاف دارد که مربوط به مقاومت فشاری متغیر سرامیک می‌باشد.

## 7- فهرست علائم

$E_K$	انرژی جنبشی (J)
$\Delta t$	بازه زمانی (S)
$h$	تغییر شکل صفحه پشتی (mm)
$Y$	تنش تسلیم (MPa)
$m$	جرم (gr)
$\dot{U}$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$u_{plas}$	سرعت امواج پلاستیک
$u$	سرعت نفوذ
$U_{phase}$	سرعت نفوذ در پایان فاز اول
$w$	سرعت ماده پشتی
$A_0$	سطح مقطع پرتابه ( $m^2$ )
$\ddot{U}$	شتاب ( $ms^{-2}$ )
$t_c$	ضخامت سرامیک
$b$	ضخامت صفحه پشتی
$L_{ERO}$	طول پرتابه در فاز قارچی شدن
$L_{ELAS}$	طول پرتابه غیر متاثر از امواج پلاستیک
$x$	فرسایش سرامیک
$\Delta m$	کاهش جرم در هر بازه زمانی (gr)
$\varphi_0$	ماکسیمم نیم زاویه مخروط سرامیکی
$Y_{C0}$	مقاومت فشاری اولیه سرامیک
$A, B, C, N, M$	ثابت‌های مقاومت برای سرامیک در مدل ماده جانسون-هلمکوئیست
$D_1, D_2$	ثابت‌های خرابی و شکست سرامیک

## علائم یونانی

$\rho$  چگالی ( $kgm^{-3}$ )

## زیر نویس

P	پرتابه
C	سرامیک
I	سطح مشترک
T	ماده هدف

## 8- مراجع

[1] A. Tate. A theory for the deceleration of long rods after impact, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol 14, pp. 387-399, 1967.

در ضخامت‌های مختلف صفحه پشتی آلومینیومی نشان داده شده است. با توجه به شکل 9، مقادیر حد بالستیک مدل اصلاحی از نتایج حد بالستیک مدل وودوارد [3] کمتر شده که علت آن نیز کاهش مقاومت فشاری سرامیک در مدل اصلاحی جدید می‌باشد. بنابراین مدل اصلاحی جدید در ضخامت‌های پایین سرامیک و صفحه پشتی، دارای هم‌خوانی خوبی با نتایج تجربی ویلکینز [14] می‌باشد و با افزایش ضخامت سرامیک و ماده پشتی، مقدار حد بالستیک مدل اصلاحی کمتر شده و از نتایج تجربی [14] فاصله می‌گیرد.

در جدول 3، مقدار حد بالستیک در ضخامت‌های مختلف سرامیک و صفحه آلومینیومی پشتی آورده شده است و خطاهای هر یک از روش‌های عددی، مدل اصلاحی در مقایسه با روش تجربی [14]، ارائه شده است.

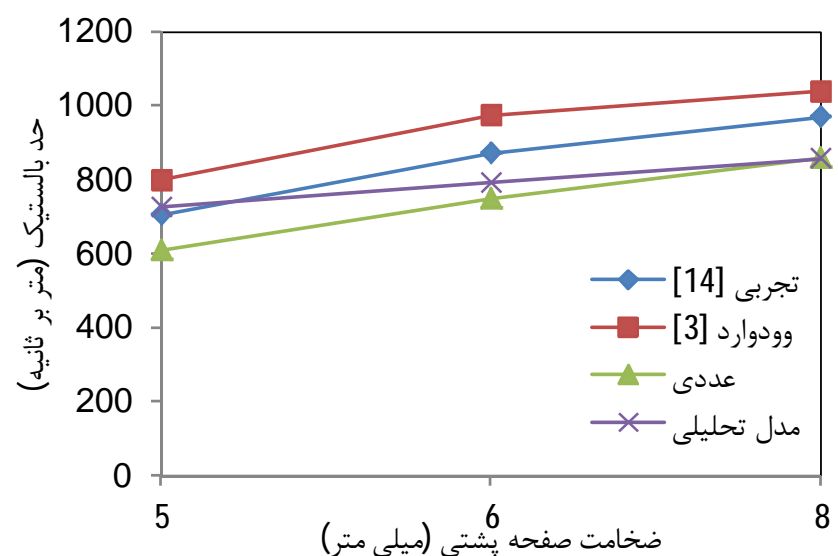
با توجه به جدول 3، مقادیر حد بالستیک در مدل اصلاحی برای ضخامت‌های پایین هدف معمولاً از مقادیر حد بالستیک تجربی بیشتر است. افزایش ضخامت سرامیک در مقایسه با افزایش ضخامت ماده پشتی، تاثیر بیشتری در مقادیر حد بالستیک مدل اصلاحی دارد.

با افزایش ضخامت ماده پشتی و سرامیک، مقادیر حد بالستیک برای مدل اصلاحی در مقایسه با مقادیر حد بالستیک تجربی کمتر شده و علت آن نیز کاهش مقاومت فشاری سرامیک در مدل اصلاحی جدید برای سرعت‌های بالا می‌باشد.

## 6- نتیجه گیری نهایی

مدل اصلاحی در این مقاله براساس مدل وودوارد بوده و برای پیش‌بینی نفوذ در اهداف سرامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج مدل اصلاحی با نتایج تجربی ویلکینز هم‌خوانی خوبی دارد. در این مدل اصلاحی با اعمال سه فاز (فرسایش، قارچی شدن و صلبیت) برای پرتابه و



شکل 9 مقایسه حد بالستیک (ضخامت سرامیک 8/64 میلی‌متر)

جدول 3 مقایسه مقادیر حد بالستیک و خطای مدل‌ها نسبت به تست تجربی

ضخامت (mm)	سرعت حد بالستیک (m/s)	خطا نسبت به روش تجربی (%)	
		مدل	مدل
سرامیک	آلومینیوم	تجربی [14]	حل عددی
4/06	3/17	275	320
4/06	5	400	420
7/85	4/5	600	575
7/85	6/3	700	670
8/64	4/9	706	610
8/64	6/1	872	750

- [9] S. Feli, ME. AlamiAaleagha, Z. Ahmadi, A new analytical model of normal penetration of projectiles into the light-weight ceramic-metal target, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 37, pp. 561-567, 2010.
- [10] M. Alizadeh, *The effect of conoid ceramic and modifying Felorence's model*, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, 2012. (In Persian)
- [11] GH. Liaghat, Tahmasebiabdar M., *Experimental and Theoretical Investigation of Perforation Process into Ceramic Targets and Presenting a Modified Theory*, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2013. (In Persian)
- [12] RL. Woodward, WA., Gooch, RG. Donnell, WJ. Perciball, BJ. Baxter, SD. Pattie, A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramic, *Int. j. Impact Eng.*, Vol. 23, pp. 771-782, 1994.
- [13] X. Zhang, G. Yang, X. Huang, Analytical model of ceramic/metal armor impacted by deformable projectile, *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 27, No. 3, pp. 287-294, 2006.
- [14] ML. Wilkins, Mechanics of penetration and perforation, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 16, pp. 793-807, 1987.
- [2] AL. Felorence, Interaction of projectiles and composite armour. *Internal Report, US Army*, Agust 1969.
- [3] RL. Woodward, A simple one-dimensional approach to modeling ceramic composite armor defeat, *Int. j. Impact Eng.*, Vol. 9, No. 4, pp. 455-474, 1990.
- [4] PC. Den Reijer, Impact on ceramic faced armours, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
- [5] I. S. Chocron Benloulou, J. Rodryquez, V. Sanchez Galvez, A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic impact behavior, *Textile Res J. Tenative*, 1997.
- [6] R. Zaera, V. Sancez-Galvez, Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal light weight armours, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 21, No. 3, pp. 133-148, 1998.
- [7] N. A. Fellows, Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 22, pp. 793-811, 1999.
- [8] GH. Liaghat, H. Shanazarl, Analysis of perforation of projectile into ceramic composites", *Journal of Amirkabir*, Vol. 15, No. 60/2, pp. 97-109, 2005. (In Persian)

Archive of SID