



## تحلیل فرآیند نفوذ در اهداف هیبریدی سرامیک/نانوکامپوزیت

هادی شانازی<sup>1</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>2\*</sup>، سعید فعلی<sup>3</sup>

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

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

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

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 تیر 1395

پذیرش: 15 شهریور 1395

ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:

نفوذ، سرامیک

نانوکامپوزیت

آزمایش تجربی

مدل تحلیلی

## چکیده

در این مقاله نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک/نانوکامپوزیت به صورت تحلیلی مدل شده است. تحلیل براساس مدل چوکرون بوده که در این مدل جهت تعیین مقاومت سرامیک رویی از تئوری انبساط حفره استفاده شده و میزان مقاومت سرامیک رویی و تغییرات آن حین نفوذ بر این اساس تعیین شده است. همچنین مقدار نیروی سطح مشترک سرامیک-کامپوزیت اصلاح شده است. کارایی بالستیک هدف سرامیکی نیز با اضافه کردن ذرات نانوزیرکونیا به ماتریس سخت کننده کامپوزیت پشتیبان، به صورت تجربی و با انجام آزمایش‌هایی بررسی شده است. در این آزمایش‌های بالستیک که به منظور تحلیل و مقایسه نتایج تحلیلی نیز انجام شده، برخورد پرتابه فولادی به روی هدف سرامیک/کامپوزیت که سرامیک رویی، آلومینا و کامپوزیت پشتیبان از الیاف بافته شده و سخت شده با رزین و با حضور نانوذرات سرامیکی از جنس زیرکونیا و به مقدار 5% وزنی می‌باشد بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد وجود نانوذرات زیرکونیا در ماتریس موجب بهبود کارایی بالستیک هدف می‌شود. نتایج تحلیلی حد بالستیک هدف نیز تطابق خوبی با آزمایش‌های انجام شده و نتایج دیگر محققین دارد.

## Analysis of penetration process in hybrid ceramic/nanocomposite targets

Hadi Shanazari<sup>1</sup>, Gholamhosein Liaghat<sup>1\*</sup>, Saeed Feli<sup>2</sup>

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

2- Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

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

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 June 2016  
Accepted 05 September 2016  
Available Online 09 October 2016

**Keywords:**  
Perforation  
Ceramic  
Nanocomposite  
Experimental  
Analytical model

## ABSTRACT

In this paper, an analytical model has been developed for modeling high velocity impact on ceramic/nanocomposite targets. In this model, penetration resistance of ceramic is determined based on cavity expansion analysis and variables during perforation of projectile onto ceramic are considered. Also, the force of ceramic-composite interface is modified. Ballistic performance of the ceramic/composite target is investigated with addition and dispersion of nano particles of zirconia ( $ZrO_2$ ) in the matrix of back up composite. Ballistic impact tests were performed to validate the analytical predictions. These tests were performed by firing 10 mm steel flat ended projectile onto ceramic/composite target. Front layer is alumina ceramic and composite laminates of back up made of E-glass/epoxy with and without nano-zirconia particle of 5 wt%. The effect of nano-zirconia dispersion in the matrix for different failure modes is discussed. Experimental results revealed an improvement in the ballistic performance of samples with nano-zirconia particle. The analytical predictions of ballistic limit velocity and residual velocity of projectile are found to be in good agreement with the experimental results.

## 1- مقدمه

بررسی مکانیزم نفوذ در کامپوزیت‌های سرامیکی و طراحی اهداف سرامیکی کامپوزیتی کار پیچیده‌ای است که از سه روش تجربه، شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی تحلیلی امکان‌پذیر است. استفاده از مدل‌های تحلیلی، از انجام آزمایش‌های پرهزینه و وقت‌گیر در ساخت زره‌ها جلوگیری می‌نمایند و می‌تواند برآورد مناسبی از کارایی زره داشته باشد. مدل‌های تحلیلی مختلفی جهت شبیه‌سازی نفوذ پرتابه در اهداف سرامیکی انجام شده است. تیت [1] در سال 1967 مدلی را جهت نفوذ پرتابه‌ها در اهداف سرامیکی، ارائه نمود. این مدل براساس معادلات اصلاح شده برنولی در سیالات، جهت تعادل فشار روی سطح مشترک پرتابه - هدف می‌باشد. در سال 1990 وود وارد [2] مدل یک بعدی جهت نفوذ در زره‌های سرامیکی ارائه نمود. این مدل فرسایش سرامیک

در حیطه کاربردهای بالستیک، بهبود کارایی بالستیک اهداف و سیستم‌های زرهی شامل کاهش وزن اهداف در عین افزایش مقاومت آن‌ها از جمله تحقیقات روز دنیاست. استفاده از سرامیک‌ها نظیر آلومینا به عنوان صفحه رویی اهداف دو لایه از جمله روش‌های افزایش کارایی بالستیک است. سرامیک‌ها خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای دارند نظیر سختی استثنایی، استحکام فشاری بالا و دانسیته پایین و در حدود نصف استیل. با این وجود سرامیک‌ها رفتار ترد و شکننده‌ای تحت تنش‌های کششی دارند. نقش اصلی سرامیک در این برخورد شکست و فرسایش پرتابه است. کامپوزیت پستی نیز انرژی جنبشی باقیمانده پرتابه و تکه‌های سرامیکی را جذب می‌کند.

با توجه به شرایط هندسی، نرخ کاهش جرم پرتابه به دست می آید:

$$\frac{dM_p}{dt} = \rho_p A_p (v - \dot{x}) \quad (2)$$

که  $Y_p$  تنش تسلیم دینامیکی،  $A_p$  سطح مقطع پرتابه،  $\dot{x}$  سرعت ناحیه سطح مشترک پرتابه-سرامیک و  $\rho_p$  دانسیته پرتابه می باشد.

با استفاده از معادله تیت معادله انرژی در فصل مشترک پرتابه/سرامیک چنین بیان می شود:

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (v - \dot{x})^2 = R_t + \frac{1}{2} \rho_c \dot{x}^2 \quad (3)$$

که  $R_t$  مقاومت سرامیک می باشد.

#### فاز دوم

این مرحله در زمان  $t=6h/c$  شروع می شود و در این زمان کل هدف در کندتر کردن پرتابه شرکت می کند. قسمت عقب پرتابه با سرعت  $v$  و سطح مشترک سرامیک-پرتابه با  $\dot{x}$  و مخروط با سرعت  $\dot{u}_0$  حرکت می کنند. اختلاف بین  $v$  و  $\dot{x}$  آهنگ فرسایش پرتابه و تفاوت بین  $\dot{x}$  و  $\dot{u}_0$  آهنگ نفوذ پرتابه به داخل مخروط سرامیکی را نشان می دهد.

معادلات حرکت پرتابه:

با توجه به سرعت سطح مشترک پرتابه/سرامیک حین نفوذ دو حالت ممکن است رخ دهد:

حالت اول:  $\dot{x} < v$

پس از تشکیل مخروط سرامیکی نفوذ پرتابه به درون حجمی از سرامیک آسیب دیده که استحکام فشاری آن کاهش یافته شروع می شود. پس از خرد شدن مخروط سرامیکی و از دست رفتن یکپارچگی و پیوستگی سرامیک، مقاومت آن کاهش می یابد. با استفاده از رابطه تیت معادله حاکم بر نفوذ چنین خواهد شد:

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (v - \dot{x})^2 = R_t + \frac{1}{2} \rho_c (\dot{x} - \dot{u}_0)^2 \quad (4)$$

که در رابطه فوق  $R_t$  مقاومت سرامیک خرد شده در برابر نفوذ پرتابه می باشد. چوکرون [4] در معادلات خود از استحکام تسلیم دینامیکی  $Y_c$  بجای مقاومت سرامیک در معادله تیت استفاده کرده است. حال در این تحقیق جهت برآورد دقیق تری از مقدار مقاومت سرامیک در برابر نفوذ  $R_t$  از تئوری انبساط حفره مخصوص مواد ترد از جمله سرامیک ها استفاده می گردد که در ادامه خواهد آمد. قابل ذکر است که شرایط اولیه در این مرحله با شرایط انتهای فاز اول برابر است. معادله سوم نیز از شرایط هندسی و بقاء جرم و پیوستگی به دست می آید:

$$\frac{dM_p}{dt} = \rho_p A_p (v - \dot{x}) \quad (5)$$

حالت دوم:  $\dot{x} = v$

در فاز دوم حین نفوذ پرتابه ممکن است سرعت ناحیه سطح مشترک پرتابه/سرامیک با سرعت انتهای پرتابه برابر شود یعنی  $\dot{x} = v$ . به عبارتی در این حالت سرعت ابتدا و انتهای پرتابه یکسان شده، پرتابه به صورت صلب رفتار کرده و فرسایشی ندارد. در این مرحله ممکن است دوحالت زیر اتفاق بیافتد:

وضعیت اول: سرعت نفوذ مخروط سرامیکی به کامپوزیت کوچکتر از سرعت پرتابه است  $\dot{u}_0 < v$ :

در این حالت اگر فشار ایجاد شده توسط پرتابه بیشتر از استحکام فشاری سرامیک باشد پرتابه به درون مخروط سرامیکی نفوذ می کند تا این که سرامیک به طور کامل فرسایش یابد. در این جا معادله حرکت به صورت زیر است:

و پرتابه را در نظر می گرفت و برآورد مناسبی از سرعت پرتابه، جرم کاهش یافته آن و نفوذ یا عدم نفوذ پرتابه و هدف ارائه می دهد. زائرا [3] مدلی تحلیلی ارائه داد که اساس آن معادلات تیت برای نفوذ پرتابه در سرامیک هاست. در حالی که رفتار ماده پستی براساس تئوری وود وارد مدل شده است. چوکرون [4] یک مدل یک بعدی ساده و کامل از برخورد بالستیک در مقابل کامپوزیت سرامیک ارائه کرد. این مدل، سرعت باقیمانده، جرم باقیمانده و سرعت پرتابه و تغییر مکان یا کرنش ماده پستی را می دهد. لیاقت [5] مدلی تحلیلی اصلاحی ارائه کرد که اساس آن مدل وود وارد بوده و با استفاده از روش تحلیل لامپدمس<sup>1</sup> سرعت حد بالستیک در اهداف سرامیکی با پشت بند فلزی با دقت خوبی پیش بینی شده است. فعلی و همکاران [6] نیز مدلی تحلیلی ارائه دادند که نفوذ پرتابه های سرتخت را در اهداف دولایه سرامیک/کامپوزیت شبیه سازی می کند.

در این مقاله مدلی تحلیلی برای پیش بینی رفتار بالستیکی اهداف سرامیکی/کامپوزیتی ارائه شده است. این فرمول بندی برای پرتابه های استوانه ای سر تخت و براساس مدل چوکرون و به کار بردن معادله برنولی می باشد. در این مدل نیروی وارد بر کامپوزیت اصلاح شده است. مقاومت به نفوذ سرامیک نیز طبق تئوری انبساط حفره به طور دقیق تر تعیین شده است. تاثیر اضافه کردن ذرات سرامیکی نانو زیرکونیا به ماتریس بر روی کارایی بالستیکی نیز بررسی شده است. تغییرات پارامترهای مختلف از جمله سختی و ضخامت سرامیک، سرعت پرتابه و زاویه مخروط سرامیکی در این ترکیب سرامیک/نانوکامپوزیتی بررسی شده است.

## 2- مدل سازی نفوذ پرتابه

در این بخش ابتدا فرمول بندی مسئله بیان می گردد و سپس اصلاحات انجام شده مورد بحث قرار می گیرند.

### 2-1- فرمول بندی

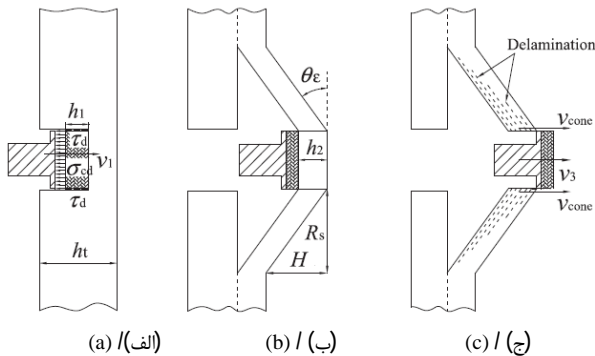
چنین فرض می شود که رفتار پرتابه صلب کاملاً پلاستیک است و شکل هندسی آن به صورت استوانه ای سرتخت است. ماده کامپوزیتی به صورت الیاف بافته شده بوده و از انرژی لایه لایه شدن کامپوزیت صرف نظر شده است. مدل تحلیلی ارائه شده نفوذ پرتابه در سرامیک را طی دو فاز اصلی شامل اول برخورد پرتابه به سرامیک رومی، ایجاد ترک و تشکیل مخروط سرامیکی و دوم نفوذ پرتابه به مخروط سرامیکی و کامپوزیت پشتیبان مدل سازی می کند.

#### فاز اول

فاز اول از لحظه برخورد پرتابه به صفحه سرامیکی آغاز شده و تا شکست کامل سرامیک مخروطی شکل ادامه دارد. در حقیقت بلافاصله پس از برخورد یک موج فشاری از جلو تا سطح عقبی آن با سرعت صوت عبور می کند. سپس این موج به صورت کششی انعکاس می یابد. به طوری که حین برگشت، سرامیک را در کشش می شکنند. دن ریجر [7] فرض می کند که در زمان  $t=6h/c$  یک مخروط سرامیکی تولید می شود که  $h$  ضخامت سرامیک و  $c$  سرعت صوت طولی است. در طول تغییر شکل مخروط سرامیکی، پرتابه فرسایش داده می شود. با استفاده از معادله حرکت سرعت پرتابه این چنین قابل محاسبه است:

$$M_p \frac{dv}{dt} = -Y_p A_p \quad (1)$$

<sup>1</sup> Lumped mass



**Fig. 1** Schematics of the stages of the perforation process. (a) first stage: shearing and compression; (b) second stage: stretching deformation; (c) end of the second stage [8]

شکل 1 شماتیک مراحل نفوذ (الف) مرحله برش و فشار، (ب) مرحله کشش الیاف و (ج) پایان مرحله دوم [8]

$$F_{1i} = \frac{\rho_t A_c \dot{u}_0^2}{8} = \frac{\pi \rho_t d_c^2 \dot{u}_0^2}{32} \quad (10)$$

بنابراین:

$$F_1 = F_{1s} + F_{1i} + F_{1c} \quad (11)$$

همان‌طور که در "شکل 1" نشان داده شده است مرحله دوم یا همان مرحله تغییر شکل کششی شروع می‌شود. در این مرحله موج فشاری ایجاد شده زمانی که به سطح پشتی کامپوزیت رسیده به صورت کششی برگشت می‌کند و در این زمان است که مرحله دوم آغاز می‌گردد. زمانی که موج تنش کششی برگشتی به سطح مشترک می‌رسد یک تغییر شکل کششی قابل توجهی در الیاف لایه‌های باقیمانده (که تحت تنش برشی وامانده نشده‌اند) ایجاد می‌شود. نیروی اینرسی عمل کننده بر روی پرتابه حین تغییر شکل و حرکت مخروط شکل یافته برابر است با:

$$F_{2i} = \frac{\rho_t A_c \dot{u}_0^2}{8} = \frac{\pi \rho_t d_c^2 \dot{u}_0^2}{32} \quad (12)$$

نیروی کششی عمل کننده روی پرتابه از طرف الیاف و لایه‌های برش نخورده نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$F_{2L} = \pi d_c h_3 \sigma_\epsilon \sin \theta \quad (13)$$

که  $h_3$  ضخامت لایه‌های برش نخورده است و  $\sigma_\epsilon = E\epsilon$  می‌باشد.

بنابراین نیروی کل کششی چنین محاسبه می‌شود:

$$F_2 = F_{2i} + F_{2L} \quad (14)$$

### 3-2- تعیین مقاومت سرامیک براساس تئوری انبساط حفره برای مواد

#### ترد-سرامیک‌ها- با ابعاد محدود

تئوری انبساط حفره اولین بار برای مواد انعطاف‌پذیر مانند فلزات که ترکی در آن‌ها اتفاق نمی‌افتد بررسی و استفاده گردید در حالی که برای مواد ترد نظیر سرامیک‌ها ترک‌های شعاعی در نواحی خرابی خواهیم داشت. براساس میزان خرابی ایجاد شده در سرامیک، نواحی پاسخ دینامیکی براساس تئوری انبساط حفره مطابق "شکل 2" می‌باشد. در این شکل  $r$  شعاع از مرکز حفره یا پرتابه،  $h, a, b, c$  به ترتیب شعاع نواحی حفره، خرد شده، ترک خورده و الاستیک می‌باشد.  $\sigma_r, \sigma_\theta$  به ترتیب تنش‌های شعاعی و محیطی و  $\sigma_f$  و  $Y$  هم استحکام کششی و استحکام فشاری سرامیک هستند. زمانی که تنش شعاعی در ناحیه دارای ترک از استحکام فشاری ماده بالاتر برود، این ماده دیگر نیروی برشی را بدون فشار محدود کننده نمی‌تواند تحمل کند. در این جا سرامیک بعد از

$$M_{p, res} \frac{dv}{dt} = -R'_t A_c \quad (6)$$

که  $M_{p, res}$  جرم پرتابه در انتهای حالت قبل بوده و  $R'_t$  چون پرتابه فرسایش ندارد ثابت می‌باشد.  $R'_t$  نیز استحکام دینامیکی سرامیک خرد شده می‌باشد.

وضعیت دوم: سرعت مخروط سرامیکی با سرعت پرتابه برابر شود زمانی که سرعت مخروط قبل از فرسایش کامل با سرعت پرتابه برابر شود، مخروط و پرتابه همانند یک پرتابه جدید با جرم و انرژی مجموع این به کامپوزیت پشتیبان نفوذ خواهند کرد. بنابراین در مدل‌سازی مجموع این دو جسم بعنوان پرتابه جدید لحاظ خواهد شد.

### 2-2- محاسبه نیروی اعمالی بر روی کامپوزیت پشتی

با توجه به لمینیت بودن کامپوزیت پشتی نیروی وارد بر پرتابه از ناحیه کامپوزیت را می‌توان به سه صورت فشاری، برشی و کششی در نظر گرفت. در حقیقت مکانیزم‌های اصلی نفوذ در کامپوزیت‌های لایه‌ای<sup>1</sup> برش پلاگ و واماندگی کششی است. زمانی که ضخامت صفحه کامپوزیتی بسیار نازک باشد، برش پلاگ تفاف نمی‌افتد و مکانیزم واماندگی تنها کشش الیاف خواهد بود. اما زمانی که ضخیم باشد و سرعت پرتابه به اندازه کافی بالا باشد، مکانیزم اصلی واماندگی همان برش پلاگ به همراه خرابی موضعی خواهد بود. با این حال مکانیزم نفوذ نوعاً تشکیل شده از هر دو مد واماندگی با یک حالت انتقالی بین این دو مد که در حقیقت وابسته به ضخامت کامپوزیت است. در مرحله اول نفوذ برش و فشار بر سطح کامپوزیت صفحه‌ای از زمان برخورد پرتابه به هدف آغاز می‌گردد و تا زمان رسیدن موج فشاری ایجاد شده به هدف (طی کردن کل ضخامت هدف) ادامه دارد. به عبارتی لایه‌های سطح مشترک در تماس با پرتابه که موج فشاری را حس کرده است با سرعت عرضی زیادی حرکت می‌کنند. اگر چه نواحی اطراف ناحیه مشترک نیز سرعت عرضی را حس می‌کنند اما این سرعت به مراتب از سرعت عرضی لایه‌های زیرین پرتابه کمتر است و همین امر از جمله دلایل برش الیاف می‌باشد. حین انتشار موج فشاری الیاف درگیر نیز بیشتر خواهد شد و بنابراین افزایش جرم آن‌ها را در پی خواهد داشت. در این حالت نیروی اینرسی ایجاد خواهد شد که خود بخشی از انرژی پرتابه را جذب می‌کند. همان‌طور که "شکل 1" نشان می‌دهد در این مرحله نیروی فشاری زیادی بین پرتابه و کامپوزیت ایجاد می‌شود. به عبارتی یک نیروی برشی در لبه‌های ناحیه سطح مشترک پرتابه/هدف ایجاد می‌شود.

جهت محاسبه نیروی فشاری دینامیکی داریم:

$$F_{1c} = \sigma_{cd} A_c = (1 + \beta \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_c}} \dot{u}_0) A_c \sigma_c \quad (7)$$

از طرفی فرض می‌شود تنش برشی به‌طور خطی در کل ضخامت کامپوزیت کاهش می‌یابد. بنابراین داریم:

$$F_{1s} = \frac{\pi d_c \tau_d [h_t - x_2]}{2}, \quad 0 \leq x_2 \leq h_t \quad (8)$$

که  $h_t$  ضخامت کل کامپوزیت،  $x_2$  میزان نفوذ پرتابه و  $\tau_d$  استحکام برشی دینامیکی است که به صورت:

$$\tau_d = \tau_s + \mu \dot{V} \quad (9)$$

بیان می‌شود که در آن  $\tau_s$  استحکام برشی شبه‌استاتیکی کامپوزیت و  $\mu$  ضریب ویسکوزیته و  $\dot{V}$  هم نرخ کرنش برشی است. نیروی اینرسی ناشی از شتاب جرم لایه‌های ناحیه تماسی در جهت حرکت پرتابه است. که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

<sup>1</sup> laminate

جهت ساخت نمونه‌ها ابتدا کامپوزیت پشته‌ای در دو مرحله ساخته شد. ابتدا ذرات نانو زیرکونیا با رزین اپوکسی به میزان 5% وزنی ترکیب شده و با استفاده از همزن به مدت 2 ساعت در دور 2000 دور بر دقیقه مخلوط و یکنواخت شدند و سپس در آون تحت خلاء جهت حباب‌زدایی نگهداشته شدند. ابعاد کامپوزیت پشته‌ای به مقدار 150×150 میلی‌متر برش خوردند. سرامیک رویی نیز با ابعاد 50×50 میلی‌متر تهیه شدند جهت بهتر نگهداشتن سرامیک بر روی کامپوزیت و به جهت جلوگیری از پاشش سرامیک بعد از برخورد پرتابه، یک فوم فشرده به ابعاد 150×150 میلی‌متر با یک سوراخ به ابعاد 50×50 در وسط، همان‌طور که در "شکل 4" نشان داده شده است، بر روی هدف جای‌گذاری شده است. در انتها مجموعه در یک قالب قرار گرفته و تحت فشار پرس تا زمان سخت شدن نگهداشته می‌شود. نمونه‌ها دارای سه ضخامت سرامیک رویی 5 و 8 و 10 میلی‌متر و دو ضخامت اسمی کامپوزیت پشته‌ای 3 و 5 میلی‌متر هستند. کامپوزیت با ضخامت 3 میلی‌متر دارای 14 لایه و نمونه با ضخامت 5 میلی‌متری دارای 24 لایه الیاف بافته شده شیشه‌ای می‌باشند. "شکل 3" شماتیکی از ترکیب هدف مورد آزمایش نشان داده شده است.

برای کلیه تست‌ها از یک لایه ضخیم موم‌های رنگی در پشت هدف جهت اندازه‌گیری میزان تروما و پروفیل برآمدگی ایجاد شده استفاده شده است. نمونه آن در "شکل 4" نشان داده است. در آزمایش‌های انجام شده از پرتابه با قطر 10 و ارتفاع 15 میلی‌متر و وزن 2.9 گرم استفاده شده است. جنس پرتابه از فولاد سخت شده تا 60 راکول و به صورت سرتخت می‌باشد.

برای انجام آزمایش‌های برخورد بالستیکی از دستگاه تنفگ گازی موجود در آزمایشگاه ضربه دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. در این دستگاه به منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه از یک جهت منبع نور لیزر و دیود حساس نوری که متصل به یک دیتا لاگر است، استفاده می‌کند. برای تامین سرعت موردنیاز از فشار گاز موجود در مخزن استفاده می‌گردد. در این مخزن با توجه به نیاز به سرعت بالا (بدلیل استفاده از اهداف مقاوم سرامیکی) از گاز خنثی هلیوم استفاده شده است.

#### 4- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی و مقایسه نتایج مدل تحلیلی این تحقیق با تئوری‌های

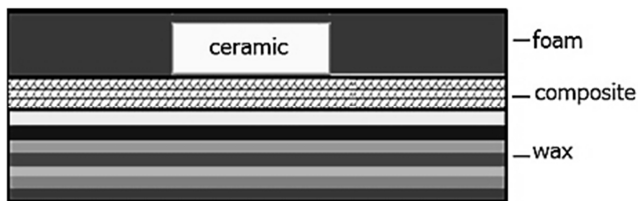


Fig. 3 Schematic of Ceramic/composite sample and arrangement of layering.

شکل 3 شماتیکی از نمونه هدف سرامیک/کامپوزیت ساخته شده و چیدمان لایه‌ها

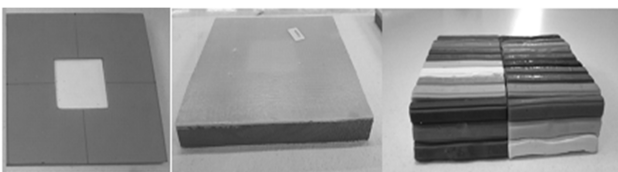


Fig. 4 Ceramic/composite target, front view (left), back surface (center) and backing colored clay block (right)

شکل 4 هدف سرامیکی/کامپوزیتی ساخته شده: نمای جلو (چپ)، سطح پشتی (وسط)، و موم رنگی (راست)

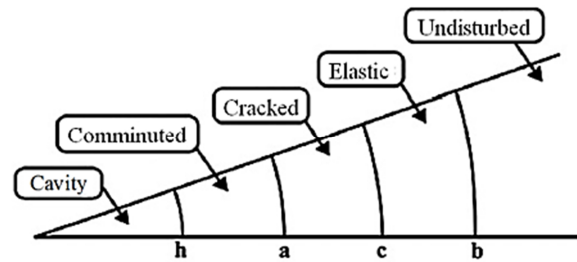


Fig. 2 Response regions in the ceramic targets

شکل 2 نواحی پاسخ در اهداف سرامیکی

شکست با ماده مور-کلمب مدل می‌شود [9]. بنابراین داریم:

$$\tau = \lambda p, \quad \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} = \lambda \frac{(\sigma_r + 2\sigma_\theta)}{3} \quad (15)$$

که  $p$  فشار و  $\lambda$  ضریب برش-فشار در معادله فوق است. معادله تعادل در این ناحیه نیز به صورت رابطه (16) است:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (16)$$

با حل همزمان معادله (14) و (15) و استفاده از شرط مرزی در این ناحیه، تنش شعاعی حاصل به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_r = -Y \left( \frac{a}{r} \right)^{2\alpha} \quad (17)$$

بنابراین مقاومت هدف به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_t = Y \left( \frac{a}{h} \right)^{2\alpha}, \quad \alpha = \frac{6\gamma}{3 + 4\gamma} \quad (18)$$

که  $\gamma$  ضریب فشار-برش در سرامیک می‌باشد. اگر هدف بی‌نهایت باشد یعنی  $b \rightarrow \infty$  آن‌گاه مقاومت هدف را می‌توان چنین محاسبه کرد:

$$R_t = Y \left[ \frac{\frac{E}{3Y}}{\left( 1 - \sqrt{\frac{\sigma_f}{Y} \frac{(1-\theta)}{\sqrt{2}}} \right)} \right]^{2\alpha/3} \quad (19)$$

پس از تعیین مقاومت به نفوذ سرامیک در هر برخورد، تغییرات این پارامتر در طول فرآیند هر برخورد نیز طبق معادله تعیین شده توسط دن ریجر محاسبه و در مدل تحلیلی اعمال می‌گردد:

$$R'_t = R_t \left( \frac{\dot{x} - \dot{x}_0}{\dot{x}_1} \right)^2 \quad (20)$$

که در آن  $\dot{x}_0$  سرعت سطح مشترک سرامیک-کامپوزیت و  $\dot{x}_1$  سرعت نفوذ در انتهای فاز یک می‌باشد.

#### 3- آزمایش‌های بالستیکی

هدف هیبریدی سرامیک/نانوکامپوزیت با ترکیب سرامیک به عنوان صفحه رویی و کامپوزیت شامل الیاف پلیمری سخت شده در ماتریس به عنوان ماده پشته‌ای، تعریف می‌شود. در این تحقیق آلومینا 99% به عنوان سرامیک رویی و الیاف بافته شده شیشه و سخت شده بارزین دارای ذرات نانو از جنس زیرکونیا<sup>1</sup> می‌باشد.

ذرات نانوی مورد استفاده در این تحقیق، در نمونه‌های نوع سوم، از جنس ذرات سرامیکی زیرکونیا می‌باشند. این ذرات در حقیقت اکسید زیرکونیوم هستند و همانند آلومینا ساختار سرامیکی دارند. این ذرات در ابتدا به صورت ذرات با اندازه میکرون (کمتر از 30 میکرون) تهیه شدند و بعد با فرآیند آسیا کاری در آسیاب سیاره‌ای به اندازه ذرات کمتر از صد نانومتر رسیدند. مقدار ذرات نانو 5% وزنی در ترکیب رزین در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup> Zirconia (ZrO<sub>2</sub>)

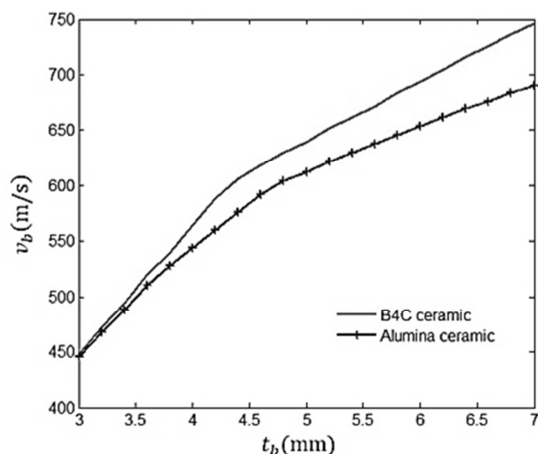


Fig. 6 Comparison of ballistic limit vs. backing thickness for two different ceramics with different hardness

شکل 6 مقایسه سرعت حد بالستیک هدف برحسب ضخامت ماده پشتی در دو سرامیک مختلف با سختی متفاوت

تغییر ضخامت کامپوزیت را برای این دو سرامیک نشان می‌دهد. در این نمودار، در سرعت‌های پایین تر، اختلاف بین این دو منحنی کم و در سرعت‌های بالاتر، بیشتر است. طبق تئوری اصلاحی ارائه شده در حالتی که انرژی و سرعت برخورد پرتابه زیاد باشد تا حدی که فرسایش سرامیک را در پی داشته باشد، آن‌گاه مقاومت به نفوذ هدف در حالت استفاده از سرامیک برون کار باید بیشتر بوده و سرعت حد بالستیک در این حالت بیشتر خواهد بود. اما زمانی که انرژی و سرعت برخورد پرتابه به اندازه‌ای نباشد که فرسایش سرامیک را موجب شود، آن‌گاه استفاده از سرامیک آلومینا و یا برون کار باید تفاوت زیادی در مقاومت به نفوذ هدف نخواهد داشت. پس آن‌چه در این‌جا مهم است این است که سختی سرامیک بیشتر در حالت فرسایش سرامیک موثر واقع می‌شود.

#### 2-4- نتایج آزمایش برخورد بالستیکی

در این بخش به بررسی آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آن و مقایسه با نتایج تئوری پرداخته می‌شود. پارامترهایی نظیر سرعت خروج پرتابه، زاویه شکست مخروط، ابعاد ترومای ایجاد شده در پشت، جرم باقیمانده پرتابه، نحوه شکست و خرابی از جمله پارامترهایی هستند که با دیگر نتایج آزمایش‌ها و همچنین با نتایج مدل تحلیلی ارائه شده مقایسه شده و پیرامون آن بحث مبسوطی صورت گرفته است.

#### 2-4-1- اندازه‌گیری و مقایسه برآمدگی<sup>2</sup> کامپوزیت پشتی

در این بخش میزان ترومای ایجاد شده در دو حالت تغییرات ضخامت سرامیک و تغییرات سرعت برخورد بررسی و مقایسه می‌شوند. سه نمونه ضخامت سرامیک 5 و 8 و 10 میلی‌متر در سرعت برخورد یکسان و ضخامت کامپوزیت پشتی یکسان در نظر گرفته می‌شوند. در آزمایش‌های مد نظر سرعت برخورد برابر 190 متر بر ثانیه و ضخامت ماده پشتی سه میلی‌متر می‌باشد. جدول 2 میزان ترومای ایجاد شده در این سه نمونه آزمایش را در مقایسه با مدل تحلیلی ارائه شده نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد میزان ترومای ایجاد شده با افزایش ضخامت سرامیک رویی (با ثابت ماندن دیگر پارامترها) کاهش می‌یابد و این نشان‌دهنده میزان جذب انرژی بیشتر توسط هدف می‌باشد.

دیگر محققین و همچنین نتایج تجربی موجود پرداخته می‌شود. نتایج آزمایش‌های انجام شده نیز ارائه و تحلیل و بحث مبسوطی صورت گرفته است.

#### 4-1- مقایسه نتایج مدل تحلیلی ارائه شده با دیگر مدل‌های تحلیلی

##### و تجربی

در نمودار "شکل 5" سرعت حد بالستیک هدف، به‌دست آمده از مدل تحلیلی ارائه شده با مدل کانگ [10] و نتایج تجربی ویلکینز [11] مقایسه شده است. در آزمایش‌های ویلکینز پرتابه فولادی با قطر 62.7 میلی‌متر و جرم 12.8 گرم به ترکیب با سرامیک رویی آلومینا و ماده پشتی کامپوزیت با الیاف شیشه (FRP) و در آزمایش‌های انجام شده توسط هترینگتون [12] پرتابه فولادی با قطر 7.12 میلی‌متر و جرم 6.48 گرم به ترکیب با سرامیک رویی آلومینا و ماده پشتی کامپوزیت با الیاف شیشه برخورد می‌کند. همان‌گونه که این نمودار نشان می‌دهد با انجام اصلاحات ذکر شده در بخش تئوری، مدل تحلیلی ارائه شده نتایج حد بالستیک را با دقت بیشتری نسبت به مدل کانگ پیش بینی کرده و به واقعیت و نتایج تجربی نزدیکتر است. در جدول 1 سرعت خروجی پرتابه مدل اصلاحی با مدل نایک [13] مقایسه شده است. در این مقایسه دوازده آرایش هدف سرامیک/کامپوزیت با توجه به آزمایش‌های بالستیکی انجام شده توسط هترینگتون [12] در نظر گرفته شده است. در این تست‌ها ضخامت سرامیک و کامپوزیت پشتی متغیر لحاظ شده است. ابعاد سرامیک 50×50 میلی‌متر و ابعاد کامپوزیت پشتی 150×150 میلی‌متر، جرم پرتابه 48.6 گرم و قطر پرتابه  $d=12.7$  میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج مدل اصلاحی و نتایج تجربی و تئوری نایک مشاهده می‌شود به نحوی که در بیشتر آزمایش‌ها درصد خطای مدل تحلیلی ارائه شده نسبت به مدل تحلیلی نایک کمتر است.

#### 4-1-1- تاثیر سختی سرامیک رویی بر روی کارایی بالستیکی

سختی سرامیک نیز پارامتر مهمی در تعیین کارایی بالستیکی اهداف سرامیک/کامپوزیت است. به‌منظور بررسی و مقایسه این پارامتر، دو نوع سرامیک مختلف، آلومینا و سرامیک برون کار باید<sup>1</sup> با سختی‌های متفاوت در دو برخورد در نظر گرفته می‌شوند. "شکل 6" تغییرات حد بالستیک برحسب

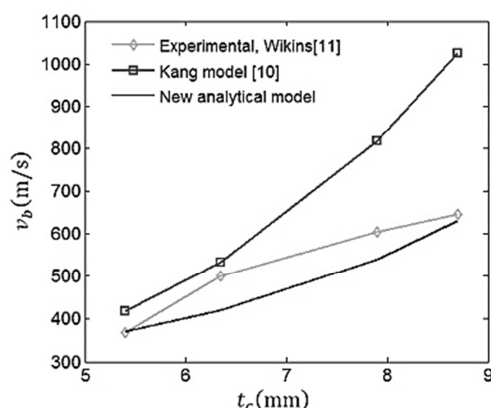


Fig 5 Comparison of ballistic limit vs. ceramic thickness of new analytical and experimental [11] and theoretical [10] results at  $t_b=4.0$  mm of composite

شکل 5 مقایسه سرعت حد بالستیک برحسب ضخامت سرامیک مدل ارائه شده با نتایج تجربی مرجع [11] و تئوری مرجع [10] در ضخامت کامپوزیت  $t_b=4.0$  mm

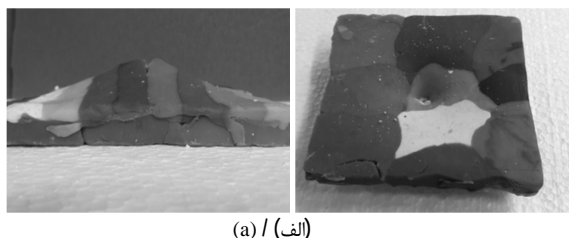
<sup>2</sup> trauma

<sup>1</sup> B<sub>4</sub>C

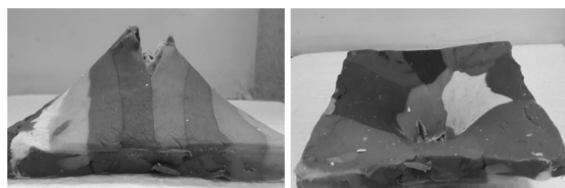
جدول 1 مقایسه سرعت باقیمانده پرتابه مدل ارائه شده با نتایج تجربی [12] و مدل تحلیلی نایک [13]

Table 1 Comparison of the residual velocity obtained with new analytical model with experimental [12] and analytical model of Naik [13]

شماره نمونه	ضخامت سرامیک mm	ضخامت کامپوزیت mm	سرعت برخورد m/s	سرعت باقیمانده (m/s)			خطای مدل جدید %	خطای مدل نایک %
				تجربی	مدل نایک	مدل جدید		
1	4	5	893	832	6.850	849	2	2.2
2	4	8	882	826	5.819	836	2.1	8.0
3	4	10	881	802	4.799	827	1.3	3.0
4	6	5	880	800	3.818	796	5.0	3.2
5	6	8	893	802	7.810	809	9.0	1.1
6	6	10	878	760	775	794	5.4	2
7	9	5	898	693	8.793	758	4.9	5.14
8	9	8	880	658	7.753	740	5.12	5.14
9	9	10	889	621	4.735	742	5.19	4.18



(الف) / (ا)



(ب) / (ب)

Fig.7 Front and back view of created trauma in colored clay back up the composite at impact velocity of 190m/s and ceramic thickness (a) 10mm and (b) 5mm.

شکل 7 ترومای ایجاد شده در خمیر پشتی هدف سرامیکی در دو نمای جانبی و روبرو با سرعت برخورد 190 m/s و ضخامت سرامیک الف 10mm و ب 5 mm

جدول 3 مقایسه ابعاد مخروط ایجاد شده در سرعت مختلف، (مدل تحلیلی و آزمایش)

Table 3 Comparison of backing trauma of experimental and new analytical model at different impact velocity

کد نمونه آزمایش	سرعت پرتابه m/s	ارتفاع مخروط پشتی (mm)	
		آزمایش	مدل ارائه شده
T1015-03	190	15	10.5
T1015-08	260	24	21.2
T1015N-06	288	29	26.1

#### 4-2-2- مقایسه سرعت خروجی پرتابه

در تست‌های بالستیک انجام شده در چهار مورد پرتابه از هدف سرامیک/کامپوزیت خارج شد. در جدول 4 مشخصات ترکیب و سرعت‌های برخورد و خروجی آمده است. از این پنج آزمایش در یک حالت سرعت خروج توسط سنسورها به درستی اندازه‌گیری و ثبت نشد که این می‌تواند به دلیل از هم پاشیدگی و خرد شدن زیاد پرتابه و سرامیک هنگام خروج و عدم تشخیص درست سنسورهای سرعت باشد. آزمایش شماره 11 و 13 (دو ردیف اول جدول) نشان می‌دهد با وجود این که سرعت برخورد آزمایش 11 کمتر از 12

جدول 2 مقایسه ترومای کامپوزیت پشتی بر حسب ضخامت سرامیک در سرعت برخورد 310 m/s

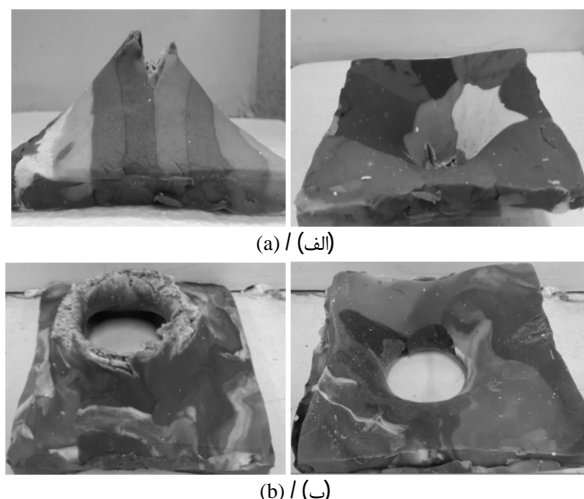
Table 2 Comparison of results of experimental and new analytical model of backing trauma at 310 m/s

کد نمونه آزمایش	ضخامت سرامیک mm	میزان برآمدگی پشت (mm)	
		آزمایش	مدل تحلیلی
T0524-13	5	خروج پرتابه	74.5
T0824-14	8	60	65.7
T1024-15	10	31	29.6

"شکل 7" مقدار ترومای ایجاد شده در موم قرار گرفته در پشت هدف را در دو نمونه ضخامت متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مقایسه نتایج آزمایش انجام شده و مدل تحلیلی ارائه شده نشان می‌دهد تطابق خوبی بین این دو وجود دارد. شکست و فرسایش پرتابه نیز با توجه به مقاومت فشاری سرامیک در برابر نفوذ متفاوت است. در نمونه‌های ذکر شده با افزایش ضخامت سرامیک، میزان فرسایش و شکست پرتابه نیز افزایش می‌یابد. نکته قابل تأمل و قابل مشاهده در این تست‌ها این است که با کاهش ضخامت سرامیک افت زیادی در مقاومت سرامیک و کارایی بالستیکی هدف دیده می‌شود.

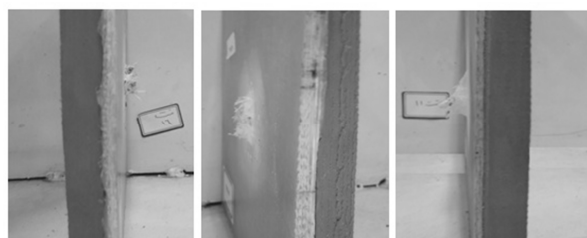
جهت مقایسه ترومای ایجاد شده بر حسب سرعت برخورد در سه تست مد نظر، اثر سرعت برخورد بر روی ارتفاع و قاعده مخروط ایجاد شده در کامپوزیت پشتی مقایسه شده اند. این نتایج در جدول 3 با نتایج مدل تحلیلی مقایسه شده اند. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت برخورد میزان ارتفاع و قاعده مخروط ایجاد شده افزایش می‌یابد.

همچنین "شکل 8" میزان تخریب سرامیک رویی را در اثر افزایش سرعت برخورد نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است میزان تخریب، ترک‌های شعاعی و ترک‌های محیطی ایجاد شده در سرامیک با افزایش سرعت برخورد افزایش می‌یابد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در اثر برخورد پرتابه به هدف، سطح برخورد پرتابه به هدف به صورت دایره می‌باشد و در محل تماس پرتابه به سرامیک میزان خرد شدن سرامیک بیشتر بوده و با فاصله گرفتن از مرکز سرامیک تکه‌های خرد شده سرامیک، بزرگ‌تر می‌باشند. ترک‌های شعاعی نیز به‌صورت دیده می‌شوند. علاوه بر ترک‌های شعاعی در روی سطح سرامیک، ترک‌های محیطی، مخروطی و ترک در ضخامت سرامیک هم ایجاد شده است که در اثر برگشت امواج تنشی از کناره‌های سرامیک می‌باشد.



**Fig. 9** Front and back view of deformation and cone formed at the colored clay of back up composite in the same target thickness and impact velocity (a) 190 m/s and (b) 310 m/s

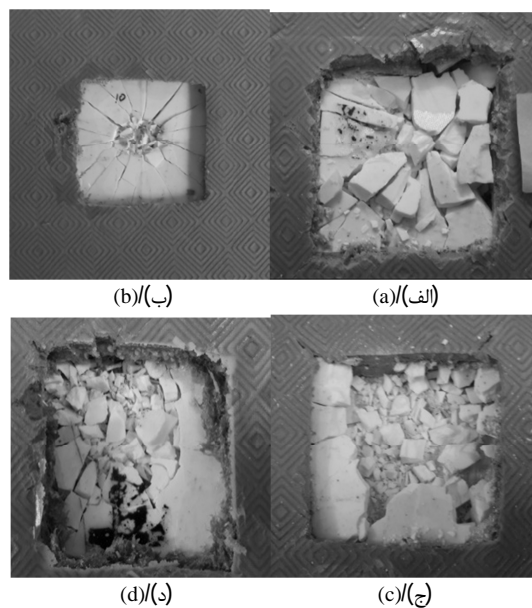
شکل 9 نمای پشت و جلوی تغییر شکل و مخروط ایجاد شده در موم پشتی سرامیکی با ضخامت یکسان و سرعت برخورد: الف) 190 m/s و ب) 310 m/s



**Fig. 10** Failure of backup composite from side view after penetration of projectile

شکل 10 نحوه شکست کامپوزیت پشتی از نمای جانبی در اثر عبور پرتابه

زاویه مخروط سرامیک تشکیل شده از پارامترهای مهم و موثر در فرآیند نفوذ در سرامیک هاست. در این قسمت تغییرات زاویه شکست مخروطی در سرامیک در دو حالت برحسب سرعت اولیه برخورد و همچنین ضخامت سرامیک محاسبه و مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است محاسبه زاویه مخروط ایجاد شده در اثر شکست، کمی مشکل بوده و این کار با دقت بر روی سرامیک‌های باقیمانده بر روی هدف و یا از کنار هم قرار دادن تکه‌های شکسته شده در اثر برخورد انجام گرفته است. جهت بررسی و مقایسه نتایج چهار تست انجام شده در نظر گرفته می‌شوند. در این آزمایش‌ها شرایط هدف یکسان بوده و تنها سرعت برخورد پرتابه به هدف متفاوت است. پس از اندازه‌گیری زوایا، مقدار زاویه و مشخصات نمونه آزمایش در جدول 5 نشان داده شده است. همان‌طور که داده‌ها در این جدول نشان می‌دهد با افزایش سرعت برخورد زاویه شکست مخروط سرامیک کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که در سرعت‌های برخورد بالاتر فرسایش بیشتر سرامیک اتفاق می‌افتد، ابعاد موثر مخروط شکل یافته کاهش می‌یابد. در حقیقت متناسب با فرسایش سرامیک، مخروط‌های سرامیکی جدید با ابعاد کوچک‌تر تشکیل می‌شوند. لازم به ذکر است که زائرا [3] نیز در تحقیقی نشان دادند که با افزایش سرعت برخورد قسمت تخریب شده حول ناحیه برخورد بیشتر شده و مخروط سرامیکی کوچک‌تر با زاویه کمتری تشکیل می‌شود. در مدل تحلیلی به دلیل این‌که سرعت‌های برخورد کمتر از 600 متر بر ثانیه هستند زاویه برخورد ثابت و برابر 68 درجه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد تطابق نزدیکی بین زوایای به‌دست آمده از آزمایش و تئوری وجود دارد. همچنین مقدار زاویه مخروط



**Fig 8** Comparison of ceramic fragmentation and the pattern of formed cracks (radial, circumferential, cone) after impact for impact velocities (a) 190 m/s, (b) 260 m/s, (c) 288 m/s and (d) 310 m/s

شکل 8 مقدار و نحوه شکست سرامیک رویی و تشکیل ترک‌های شعاعی، محیطی و مخروطی ایجاد شده در سرعت برخوردهای: الف) 190 m/s ب) 260 m/s ج) 288 m/s د) 310 m/s

جدول 4 مقایسه سرعت باقیمانده پرتابه (مدل تحلیلی جدید و آزمایش)

**Table 4** Comparison of residual velocity of projectile (experimental and new analytical model)

کد نمونه آزمایش	سرعت برخورد m/s	سرعت باقیمانده پرتابه آزمایش	سرعت باقیمانده پرتابه مدل تحلیلی
T0515-11	288	216	175
T0524-13	310	213	190
T0524-16	288	عدم اندازه‌گیری	168
T0815-09	260	0	0
T1024-15	310	0	0

است ولی سرعت باقیمانده پرتابه بیشتر است که البته این به دلیل ضخامت بیشتر ماده پشتی در تست 13 می‌باشد. در این جدول سرعت باقیمانده پرتابه حاصل از محاسبات تئوری مدل ارائه شده در این تحقیق نیز جهت مقایسه آمده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج وجود دارد. در نمونه آزمایش 13 سرعت خروج حدود 10% و در آزمایش 11 حدود 18% کمتر از مدل تحلیلی تخمین زده شده است. در "شکل 9" تغییر شکل و پاره شده خمیر پشتی در دو نمونه آزمایش با سرعت‌های 190 و 310 متر بر ثانیه نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است شدت تغییر شکل در حالت سرعت بالاتر، بیشتر و قابل توجه است. نکته قابل توجه در نمونه‌هایی که پرتابه خارج شده این است که پرتابه تقریباً به لحاظ ظاهری سالم و تنها تغییر شکل اندکی در نوک پرتابه حاصل شده است. در "شکل 10" نیز نمای جانبی هدف سرامیکی که در اثر عبور پرتابه موجب شکست کامپوزیت شده است نشان داده شده است.

#### 3-2-4 - مقایسه زاویه شکست ایجاد شده در سرامیک



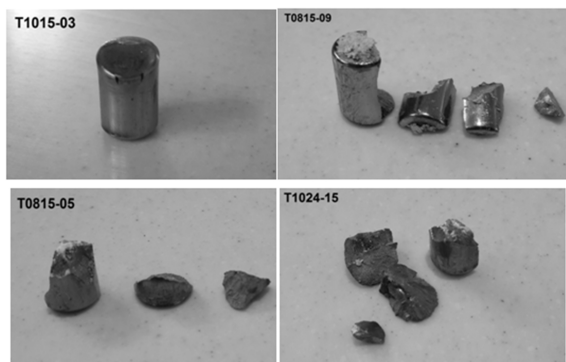
حقیقت با افزایش سرعت برخورد، نیروی سطح مشترک پرتابه/سرامیک افزایش یافته و موجبات فرسایش و شکستگی بیشتر پرتابه را به همراه دارد. با کاهش سرعت پرتابه و رسیدن به سرعت موج پلاستیک و کمتر از آن، دیگر فرسایش پرتابه اتفاق نمی افتد و در این حالت پرتابه تنها تغییر شکل می دهد و حالت قارچی شکل به خود می گیرد. اگر قطر حالت قارچی شکل به 25.1 برابر قطر اصلی پرتابه برسد پرتابه در ناحیه سر دچار برش خواهد شد. در صورتی که سرعت پرتابه آنقدر کم باشد که نیروی سطح مشترک آن با سرامیک از نیروی تغییر شکل و فرسایش پرتابه کمتر شود پرتابه حالت صلب بخود می گیرد و دیگر تغییر شکل و فرسایشی نخواهد داشت.

#### 4-2-5 - اثر حضور نانوذرات زیرکونیا در کامپوزیت پستی

جهت تاثیر حضور ذرات نانو در صفحات کامپوزیت پشتیبان سرامیک بر روی کارایی بالستیکی، مقدار ارتفاع و قاعده برآمدگی ایجاد شده در کامپوزیت پستی در چند نمونه آزمایش انجام شده اندازه گیری و مقایسه مقایسه شده است. همان طور که در فصل پیشین اشاره شد نانوذرات اضافه شده به رزین از جنس زیرکونیا یا اکسید زیرکونیوم که خود نوعی سرامیک است می باشد. درصد نانوی ترکیب نیز 5% در نظر گرفته شد و این مقدار با توجه به مطالعات صورت گرفته پیرامون اثر نانوذرات از جنس های مختلف بر رروی کارایی بالستیکی کامپوزیت های پلیمری به دست آمد که نشان می دهد مقدار بهینه درصد نانو حدود 3 تا 5 درصد می باشد. در حقیقت در این تحقیق، اثر حضور ذرات نانو بر روی کارایی بالستیکی هدف در حالت بهینه آن، مورد بحث، بررسی و آزمایش قرار گرفته است و بر روی تعیین مقدار بهینه درصد نانو، آزمایشی انجام نشده است. جدول 8 در سه تست انجام شده با سه ضخامت سرامیک مختلف، مقدار ارتفاع و قاعده مخروط (ترومای) ایجاد شده در کامپوزیت را در دو حالت بدون نانو و با حضور ذرات نانو مقایسه کرده است. مقدار ضخامت کامپوزیت پستی ثابت و برابر 3 میلی متر می باشد. سرعت

**جدول 7** مقایسه جرم باقیمانده پرتابه در سرعت های متفاوت (آزمایش و مدل تحلیلی)  
**Table 7** Comparison of residual mass of projectile at different impact velocity (analytical model and experimental)

کد نمونه	سرعت برخورد	جرم باقیمانده پرتابه (گرم)
آزمایش	m/s	مدل تحلیلی
T0815-09	260	5.2
T0815-05	288	3.67
T1024-15	310	2.43



**Fig. 11** Erosion and deformation of projectile after impact at different velocities shown in Tab.7

**شکل 11** فرسایش و تغییر شکل پرتابه پس از برخورد در سرعت های مختلف جدول 7 و طبق کد آزمایش نشان داده شده در تصویر

**جدول 5** مقایسه زاویه شکست مخروط در سرعت برخورد متفاوت.

**Table 5** Comparison of angle ceramic cone at different impact velocity.

کد نمونه	سرعت برخورد (m/s)	زاویه شکست مخروط
T1015-03	190	66
T1015-08	260	63
T1015N-06	288	61
T1024-15	310	60

سرامیکی ایجاد شده برحسب ضخامت سرامیک رویی اندازه گیری شده است. مطابق جدول 6 این زاویه در سه ضخامت سرامیک 5 و 8 و 10 میلی متر مقایسه شده است. سرعت برخورد در این نمونه ها یکسان و برابر 190 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

نتایج نشانگر آن است که با افزایش ضخامت سرامیک زاویه شکست نیز افزایش می یابد. در حقیقت زمانی که ضخامت سرامیک بیشتر باشد مقاومت سرامیک در برابر نفوذ و ضربه پرتابه بیشتر خواهد بود و فرسایش کمتری در سرامیک ایجاد می شود و در بنابر این ابعاد مخروط سرامیکی و در نتیجه زاویه شکست آن بیشتر خواهد شد.

#### 4-2-4 - محاسبه و مقایسه جرم باقیمانده پرتابه در اثر برخورد

در سرامیک برخلاف اهداف داکتایل نظیر انواع کامپوزیت ها و فلزات، پرتابه پس از برخورد فرسایش یافته و شکسته می شود. در حقیقت به دلیل سختی بالای سرامیک در اثر برخورد بالستیک، سرامیک خود شکسته و همچنین باعث فرسایش و شکست پرتابه نیز می شود. در ناحیه سطح مشترک پرتابه/سرامیک نیز دما بالا رفته و حتی باعث ذوب موضعی پرتابه نیز می شود. این فرآیند در عمل نیز در تست های انجام شده مشاهده می شد به این صورت که پس از برخورد، ناحیه سطح مشترک پرتابه با هدف به شدت داغ بوده و اثرات فرسایش نیز قابل مشاهده بود.

"شکل 11" نمایی از شکست پرتابه در اثر برخورد به هدف سرامیکی با سرعت برخوردهای متفاوت را نشان می دهد. جدول 7 جرم باقیمانده پرتابه در اثر برخورد در سه نمونه آزمایش با مشخصات و کد نمونه اشاره شده را نشان می دهد. در این جدول داده های به دست آمده از آزمایش با نتایج حاصله از مدل تحلیلی ارائه شده نیز مقایسه شده است. همان طور این جدول و "شکل 11" نشان می دهد با افزایش سرعت برخورد، میزان شکستگی و فرسایش پرتابه افزایش می یابد.

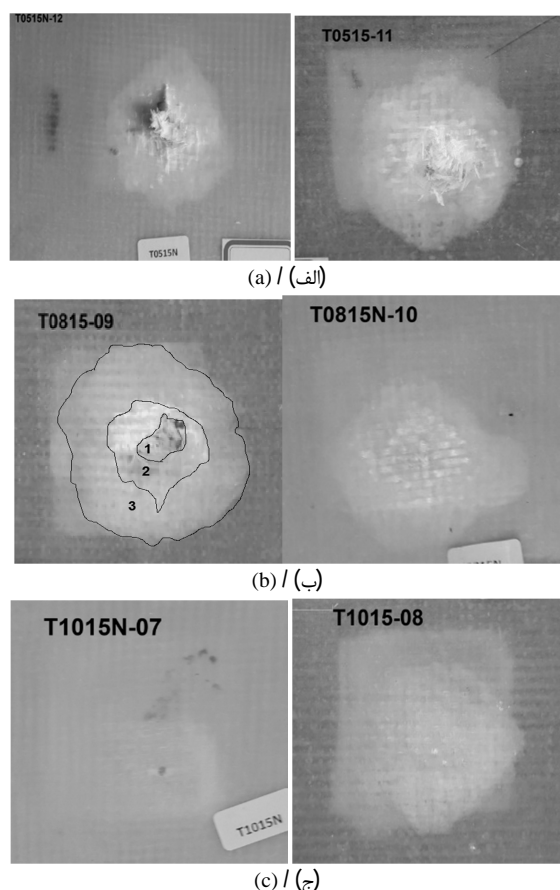
در حقیقت چنین استنباط می شود که در سرعت های برخورد بالا، زمانی که سرعت پرتابه بزرگتر از سرعت موج پلاستیک در پرتابه می شود، فشار در سطح مشترک پرتابه - سرامیک بسیار زیاد شده و بیشتر از استحکام فرسایشی (استحکام لازم جهت فرسایش ماده) پرتابه خواهد شد و بنابر این پرتابه فرسایش داده می شود و به اجزاء و قطعات کوچکتر شکسته می شود. در

**جدول 6** تغییرات زاویه شکست مخروط برحسب ضخامت سرامیک

**Table 6** Variation of angle of ceramic cone vs. ceramic thickness

کد نمونه	سرعت برخورد	ضخامت سرامیک	زاویه شکست
آزمایش	m/s	mm	مخروط (درجه)
T0524-13	310	5	32
T0824-14	310	8	56
T1024-15	310	10	60





**Fig. 12** Comparison of damage area and delamination of composite laminate back up ceramic in two cases, with nano(left) and without nano(right) at three ceramic thickness,(a)5mm,(b)8mm and (c)10mm

شکل 12 مقایسه مقدار و گسترش خرابی در کامپوزیت پشتهایان سرامیک در دو حالت نانو (چپ) و بدون نانو (راست) و سه ضخامت سرامیک الف) 5 و ب) 8 و ج) 10 میلی متر

1. مدل تحلیلی- اصلاحی ارائه شده در این پژوهش، نفوذ در کامپوزیت های سرامیکی را با دقت خوبی پیش بینی می کند. دقت پیش بینی این مدل از مدل های نایک [13] و کانگ [10] بهتر بوده و به یافته های تجربی نزدیکتر است.
2. نتایج تست های بالستیکی انجام شده در این پژوهش نشان می دهد که زاویه مخروط سرامیکی با کاهش ضخامت سرامیک رویی کاهش می یابد.
3. با تعیین مقاومت سرامیک با استفاده از تئوری انبساط حفره، مقاومت سرامیک حین فرآیند نفوذ پرتابه، ثابت نبوده و کاهش می یابد. بر این اساس مقدار اولیه مقاومت سرامیک نیز به سرعت برخورد بستگی داشته و متفاوت خواهد بود. نتایج نشان می دهد که اعمال این تغییرات شرایط را به واقعیت و تجربه نزدیکتر می کند.
4. تا زمانی که سرامیک فرسایش نیابد، میزان سختی سرامیک روئی در مقاومت به نفوذ هدف تاثیر کمی دارد ولی در صورت فرسایش سرامیک، با افزایش سختی سرامیک سرعت حد بالستیک هدف افزایش خواهد یافت.
5. افزایش ضخامت سرامیک و ماده پشته، افزایش سرعت حد بالستیک را به همراه دارد. در حقیقت افزایش ضخامت های سرامیک و ماده پشته افزایش مقاومت به نفوذ هدف را موجب می شود.
6. اضافه کردن ذرات نانو زیرکونیا به کامپوزیت پشته، کارایی بالستیکی

جدول 8 مقایسه ابعاد مخروط پشته و خرابی ایجاد شده در نمونه های دارای نانوذرات و بدون نانوذرات زیرکونیا

**Table 8** Comparison of backing trauma and damage area in back up composite with and without nano-zirconia

کد نمونه	نوع	سرعت	ترومای	قاعده	مساحت
آزمایش	ترکیب	برخورد	پشت	مخروط	ناحیه
		m/s	mm	Mm	خرابی mm <sup>2</sup>
T0515-11	بدون نانو	288	40	100	2400
T0515N-12	حضور نانو	288	40	95	2500
T0815-09	بدون نانو	260	38	98	3300
T0815N-10	حضور نانو	260	33	88	2100
T1015-08	بدون نانو	260	25	85	1900
T1015N-07	حضور نانو	260	24	90	750

برخورد نیز در این مقایسه با شرایط یکسان در نظر گرفته شده است. همان طور که این جدول نشان می دهد نمونه های دارای ذرات نانو ترومای کمتری نسبت به ترکیب ساده بدون نانو می باشند و این نشان دهنده افزایش استحکام ماده پشته و مقاومت در برابر تغییر شکل در نمونه های دارای ذرات نانو می باشد. میزان و ابعاد تخریب کامپوزیت پشته نیز در نمونه های مذکور در "شکل 12" نشان داده شده است. در این سه نمونه، ضخامت کامپوزیت پشته یکسان و برابر 3 میلی متر و ضخامت سرامیک متغیر و به ترتیب برابر 5 و 8 و 10 میلی متر می باشد. آن گونه که این شکل نشان می دهد ناحیه خرابی در پشت کامپوزیت را می توان به سه قسمت تقسیم نمود. ناحیه یک: ناحیه خرابی موضعی که بر اثر تشکیل پلاگ یا گسیختگی الیاف اولیه تشکیل می شود. دوم: ناحیه خرابی یا لایه لایه های شدن کامپوزیت و بعضا خرابی الیاف ثانویه نزدیک محل برخورد و سوم: نفوذ منطقه لایه لایه های شدن و گسترش تنش و شکست بیشتر رزین می باشد.

همان طور که در "شکل 12" مشاهده می شود، ناحیه و مساحت خرابی در نمونه های دارای نانوذرات زیرکونیا کمتر از نمونه های بدون نانو می باشد. این موضوع نشان می دهد مکانیزم های لایه لایه های شدن و ترک ماتریس، انرژی کمتری در نمونه نانو دار نسبت به نمونه بدون نانو دریافت می کند. در حقیقت با وجود ذرات نانو سرامیکی، سفتی و استحکام کامپوزیت پشته افزایش یافته و این افزایش سفتی موجب تغییر شکل خمشی موضعی کمتر و در نتیجه خرابی کمتری در محل برخورد می شود. مقدار مساحت خرابی در هر شش نمونه محاسبه شده و در جدول 8 آمده است. البته در مورد آزمایش 11 و 12 (دو ردیف اول جدول) به دلیل این که سرعت برخورد از سرعت حد بالستیک بالاتر بوده و پرتابه از هدف عبور کرده است اختلاف کمی بین مساحت ناحیه خرابی این دو نمونه وجود دارد که آن هم نمونه بدون نانو مقدار کمتری از خود نشان داده است. این موضوع نشان می دهد میزان ناحیه خرابی در سرعت های کمتر و بیشتر از حد بالستیک با هم متفاوت است. در حقیقت در سرعت های بالاتر از حد بالستیک زمان کافی برای انتشار موج تنش وجود ندارد و قبل از این که موج تنش و به تبع آن ناحیه خرابی گسترش یابد پرتابه از هدف سرامیکی عبور می کند.

## 5- نتیجه گیری

در این تحقیق با بررسی مدل های تحلیلی نفوذ در کامپوزیت های سرامیکی و همچنین انجام آزمایش های بالستیک، مدل تحلیلی جامعی ارائه شد. نتایج این تحقیق که در دو بخش: تحلیل نفوذ پرتابه در کامپوزیت های سرامیکی و انجام آزمایش های بالستیکی، صورت گرفته را می توان چنین بیان کرد:

- H.Hadavinia, A.Aboutorabi, Analytical and numerical investigation of projectile perforation into ceramic-metal targets and presenting modified theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 353-359, 2015. (in Persian فارسی)
- [6] S. Feli, M. H. Yas, M. R. Asgari, An analytical model for perforation of ceramic/multi-layer planer woven fabric target by blunt projectiles, *Composite Structure*, Vol. 93, pp. 548-556, 2011.
- [7] PC. Den Reijer, *Impact on ceramic faced armour*, Ph.D. thesis, Delf University of Technology, Netherlands, 1991.
- [8] Changhai Chen, Xi Zhu, Hailiang Hou, Zhong Luo, Ting Tang, Analytical model for high-velocity perforation of moderately thick ultra-high molecular weight polyethylene-woven laminated plates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 17, pp. 2219-2136, 2015.
- [9] H. R. Jianguo Ning, Dynamic response of alumina ceramics impacted by long tungsten projectile, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 62, pp. 60-74, 2013.
- [10] K. Kang, K.Cho, An estimation of ballistic limit for ceramic- FRP composite armor, *KSME Journal* Vol. 5, No. 2, pp. 140-148, 1991.
- [11] M. Wilkins, Mechanics of penetration and perforation, *International Journal of Engineering Science* Vol. 16, No. 11, pp. 793-807, 1978.
- [12] J. Hetherington, B.Rajagopalan, An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours, *International Journal of Impact Engineering* Vol. 11, No. 1, pp. 33-40, 1991.
- [13] N. Naik, S. Kumar, D. Ratnaveer, M. Joshi, K. Akella, An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors, *International Journal of Damage Mmechanics* Vol. 22, No. 2, pp. 145-187, 2012
- بهتری را به لحاظ توزیع انرژی در سطح بیشتر ماده و کاهش برآمدگی و ترومای پشت به همراه دارد. اضافه نمودن 5% نانوذرات زیرکونیا به کامپوزیت پستی در شرایط یکسان و در آزمایش انجام شده حداقل 35% مساحت ناحیه خرابی را کاهش می دهد.
7. اضافه نمودن 5% نانوذرات زیرکونیا به کامپوزیت پستی به نمونه آزمایش های انجام شده بین 4% تا 12% ترومای پشت را کاهش داده است.
8. به دلیل وجود نانوذرات زیرکونیا در ماتریس، لایه لایه شدن کامپوزیت پستی به کنترل شده و موجب خرابی کمتر در کامپوزیت می شود.

## 6- منابع

- [1] A.Tate, A theory for the deceleration of long rods after Impact, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol 14, pp. 387-399, 1967.
- [2] R. L. Woodward, A simple one dimensional approach to modeling ceramic composit armour defeat, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 9, pp. 455-474, 1990.
- [3] R.Zaera, V. Sanchez-Galvez, Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 133-148, 1998.
- [4] I. Chocron Benloulou, V. Sanchez-Galvez, A new analytical model simulate Impact on to ceramiocceramic/ composite Armours, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 2, No. 6, pp. 461-471, 1998.
- [5] G. Liaghat, M. Tahmasebiabdar, H. Shanazari, A. Khodadadi,