

# تحلیل نفوذ پرتابه در کامپوزیت های سرامیکی و ارائه مدل اصلاحی

هادی شانظری  
دانشجوی کارشناسی ارشد

غلامحسین لیاقت  
استاد

سعید هدایت رسا  
دانشجوی کارشناسی ارشد  
مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

تحلیل مکانیزم نفوذ در زره‌هایی که سرامیک به عنوان صفحه جلویی در آنها به کار برده می‌شود، ساده نیست و تاکنون نظریه کاملی که جواب گوی مراحل حقیقی نفوذ باشد ارائه نشده است. به دلیل گران و پرهزینه بودن آزمایش‌های بالستیک، روش‌های تحلیلی مکانیزم نفوذ، اهمیت خود را بیشتر نشان می‌دهند. در این مقاله با بررسی مدل‌های تحلیلی ارائه شده تاکنون، یک مدل اصلاحی در زمینه نفوذ در کامپوزیت‌های سرامیکی ارائه شده است که در آن سرعت پرتابه و جرم باقیمانده آن در هر فاصله زمانی بعد از نفوذ تعیین می‌شود. اساس مدل این مقاله، تئوری وود وارد<sup>۱</sup> و اصلاحات به انجام رسیده در این تئوری در خصوص تغییر در زاویه مخروط تشکیل شده در برخورد، تغییر شکل دماغه پرتابه و در نظر گرفتن فازهای فرسایش، قارچی شدن و صلب ماندن پرتابه است. نتایج حاصل از این مدل تطابق خوبی با یافته‌های تجربی و همچنین نتایج تئوری‌های دیگر دارد.

## کلمات کلیدی

نفوذ - کامپوزیت‌های سرامیکی - مدل تحلیلی - بالستیک

## Perforation Analysis of Projectile Into Ceramic Composites and a Modified Analytical Model

G.Liaghat  
Professor

H.Shanazari  
M.Sc.

S.Hedaiat Rasa  
M.Sc.

Mechanical Engineering, Tarbiat Modarres University

## Abstract

*Perforation Analysis of projectile into ceramic composite armoures is not very easy and upto now a complete theory for this purpose has not been developed. In this paper a modified analytical model is introduced, which determines the residual velocity and mass of the projectile at evry time step after the process. In this model some modification such as, change in the angle of cone of ceramic after impact, change in projectile nose during the different phases of perforation, are made to the Woodward's theory The theoritical result were compared to the others theory and all the experimental ones and very good agreement was observed.*

## Keyword

*penetration - ceramic composites - analytical model - ballistic*

سرامیک ها و کامپوزیت های سرامیکی کاربرد زیادی در ساخت اهداف زرهی مانند خودروها و جلیقه های ضد گلوله دارند. تحلیل نفوذ پرتابه ها در اهداف سرامیکی از مسائل تحقیقاتی روز به روز به شمار می رود. به سبب هزینه بسیار آزمایش های بالستیکی، اخیراً به روش های تحلیلی نفوذ در سرامیک ها توجه می شود. از جمله کاربردهای سرامیک استفاده از آن به عنوان صفحه جلویی در زره های سرامیکی است. سرامیک ها دو خصوصیت بارز دارند که موجب می شود آنها برای کاربردهای زرهی مناسب و مفید باشند. یکی دانسیته پایین و دیگری استحکام فشاری بالا است که امکان طراحی سیستم های زرهی مقاوم به نفوذ و سبک وزن را می دهند. با این وجود از موارد ضعف سرامیک ها به عنوان هدف، رفتار شکنندگی یا به عبارتی تردی آنهاست. تردی سرامیک انتشار ترک را تسهیل می کند و ممکن است در اثر ضربه و نفوذ، موجب تخریب و خرد شدن آن شود.

هر چند روش های تحلیلی دقت روش های تجربی را ندارد ولی در زمانی کوتاه می توان با تغییر پارامترهای مختلف مؤثر در نفوذ از جمله سرعت و جرم پرتابه، ضخامت هدف و ... آرایش های مختلف پرتابه - هدف را تحلیل کرد.

در کاربردهای زرهی سرامیک ها به تنهایی به کار نمی روند و معمولاً یک ماده نرم نازک یا ضخیم به عنوان پشتبند آنها استفاده می شود تا سرامیک، خرد و از هم پاشیده نشود. با توجه اینکه ماده پشتی نازک یا ضخیم باشد، تحلیل نفوذ در این اهداف کامپوزیتی متفاوت خواهد بود.

مسئله مهم در کاربرد زره های سرامیکی، کاهش وسعت ناحیه تخریب شده در برخورد گلوله است. ترک های شعاعی و اسپال از محل برخورد به قسمت های جانبی سرامیک توسعه می یابد. با افزایش استحکام مواد پشتی می توان وسعت ناحیه تخریب شده را کاهش داد. این مواد باعث کاهش تنش خمشی که در زمان برخورد ایجاد می شوند. اگر ناحیه تخریب شده در سرامیک کاهش یابد، زره در برخوردهای بعدی نیز می تواند مقاومت کند. برای همین لازم است مقاومت سرامیک ها به انتشار ترک افزایش یابد که این عمل می تواند با افزایش چقرمگی صورت پذیرد.

## بررسی مدل های تحلیلی ارائه شده

بررسی تحلیل مکانیزم نفوذ کاری بسیار پیچیده است و تاکنون تئوری خاصی که جوابگوی کامل مراحل نفوذ باشد ارائه نشده است. در روش های تحلیلی با استفاده از یک سری معادلات دیفرانسیلی و خاص می توان به جواب های تقریبی دست یافت و تنها با تغییر پارامترهای مؤثر در نفوذ می توان به راحتی آرایش های مختلف هدف - پرتابه را تحلیل کرد. تحقیقات زیادی در زمینه نفوذ در سرامیک ها صورت گرفته است. اولین مدلی که در این زمینه ارائه شده است. مدل تحلیلی فلورنس<sup>۱</sup> است که با به کارگیری پارامترهای مؤثر و مربوط به خواص پرتابه و هدف، سرعت حد بالستیکی را برای زره های سرامیکی - فلزی تعیین کرده است.

مدل وود وارد<sup>۲</sup> [۲] مکانیزم نفوذ را بر اساس روش لامپد مس بررسی می کند. در این مدل نفوذ کامل در زره های سرامیکی - فلزی برای دو حالت مواد پشتی نازک و ضخیم بررسی می شود و روابط مناسبی جهت محاسبه سرعت و جرم باقیمانده پرتابه در هر لحظه زمانی پس از برخورد به دست می دهد.

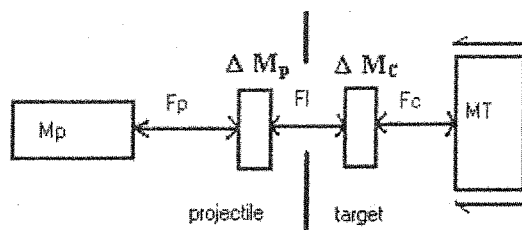
دن ریجر<sup>۳</sup> [۳] نیز مدلی ارائه داد که با استفاده از آن می توان سرعت و نیروی سطح مشترک هدف - پرتابه را در هر لحظه زمانی محاسبه کرد.

مدل زائرا<sup>۴</sup> [۴] برخورد بالستیکی پرتابه ها روی کامپوزیت های سرامیکی - فلزی را شبیه سازی می کند. نفوذ در سرامیک بر اساس معادلات Tate<sup>۵</sup> بوده و پاسخ فلز پشتی بر اساس تئوری وود وارد است.

در سال ۱۹۹۹ فلورز<sup>۶</sup> [۵] مدلی کاملاً تحلیلی ارائه داد که نفوذ در اهداف سرامیکی نیمه بی نهایت را بررسی می کند. روش تجزیه و تحلیل در این مدل نیز روش لامپد مس است. لازم به ذکر است که بررسی کارهای تجربی و همچنین شبیه سازی های عددی که در این زمینه زیاد صورت گرفته است [۲۱-۶] می تواند در تحلیل مکانیزم نفوذ نیز بسیار مؤثر باشد.

## مدل اصلاحی ارائه شده در این مقاله

در این بخش مدلی اصلاحی برای نفوذ پرتابه در اهداف سرامیکی - فلزی با ماده پستی نازک ارائه شده است که اساس آن تئوری وود وارد [۲] است. مدل لامپد مس برای پاسخ سیستم بصورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) مدل Lumped mass

معادلات حرکت سیستم را می‌توان چنین نوشت:

$$F_p = M_p \cdot \ddot{U}_p \quad (۱)$$

$$F_c - F_I = -\Delta M_c \cdot \frac{\dot{U}_c}{\Delta t} \quad (۲)$$

$$F_I - F_p = -\Delta M_p \cdot \frac{\dot{U}_p}{\Delta t} \quad (۳)$$

$$F_T - F_c = -M_T \cdot \ddot{U}_T \quad (۴)$$

که  $F$  نشان دهنده نیرو،  $M$  نشان دهنده جرم و  $\Delta t$  فاصله زمانی و  $U$  سرعت است. و اندیسهای T,C,I,P به ترتیب مربوط به نفوذ کننده، سطح مشترک پرتابه - هدف، سرامیک و هدف می‌باشد. برای یک پرتابه نوک تخت با سطح مقطع  $A_0$  معادلات پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta M_p = -\rho_p \cdot A_0 \cdot \Delta t \cdot (\dot{U}_p - \dot{U}_c) \quad (۵)$$

$$\Delta M_c = -\rho_c \cdot A_0 \cdot \Delta t \cdot (\dot{U}_c - \dot{U}_T) \quad (۶)$$

اصلاحات اجرا شده در خصوص فازهای مختلف پرتابه حین نفوذ (فرسایش، قارچی شکل و صلب) و تعیین نیروی سطح مشترک  $F_I$  در این حالت، شکل هندسی دماغه پرتابه و تغییرات در نیمه زاویه مخروط تشکیل شده،  $\phi$ ، در اثر برخورد است. اصلاحات صورت گرفته به شرح زیر است:

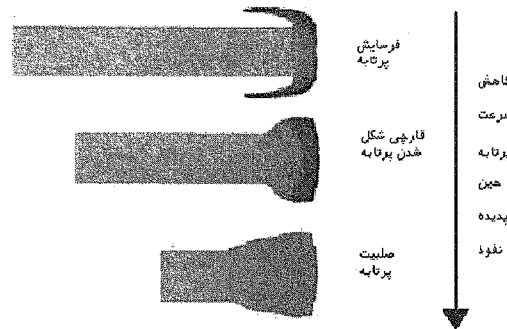
الف - می‌توان سه فاز مختلف برای پرتابه در حین برخورد در نظر گرفت. برطبق تحقیقات دن ریجر پرتابه ابتدا پس از برخورد فرسایش یافته و سپس حالت قارچی شکل به خود می‌گیرد.

همچنانکه فشار سطح مشترک حین برخورد کاهش می‌یابد، پرتابه نیز رفتار صلب از خود نشان خواهد داد. (شکل ۲) پس می‌توان برای این سه فاز، یعنی، فرسایش، قارچی شکل و صلب، نیروی سطح مشترک ( $F_I$ ) را جداگانه تعریف کرد.

بدین صورت که:

- زمانی که پرتابه فرسایش می‌یابد و در حقیقت نیروی سطح مشترک  $F_I$  از نیروی تسلیم پرتابه بیشتر می‌شود و پرتابه فرسایش می‌یابد:

$$F_I = \left[ \rho_P \cdot A_0 (\dot{U}_P - \dot{U}_C)^2 \right] + F_P \quad (7)$$



شکل (۲) روند تغییر شکل پرتابه در اثر برخورد.

با کندشدن پرتابه، سرعت برخورد نسبی  $(\dot{U}_P - \dot{U}_C)$ ، به زیر سرعت موج پلاستیک  $U_{PLAS}$  افت می‌کند، جا به جایی نسبی بین انتهای پرتابه و سطح مشترک سرامیک / پرتابه می‌تواند با تغییر شکل پلاستیک پرتابه تطبیق داده شود. بنابراین پرتابه همانند شکل ۲- قارچی شکل خواهد شد بدین ترتیب:

$$F_I = \rho_P \cdot A_0 \cdot \left[ \dot{U}_{PLAS} (\dot{U}_P - \dot{U}_C) - \ddot{U}_C (L_{ERO} - L_{ELA}) \right] + F_P \quad (8)$$

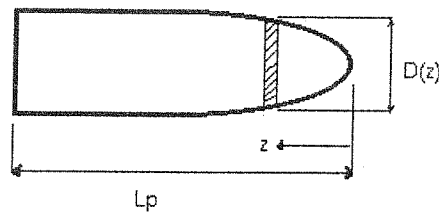
که  $L_{ERO}$  طول پرتابه در ابتدای فاز قارچی شکل و  $L_{ELA}$  طولی از پرتابه است که موج پلاستیک طی نکرده است. در این معادلات  $\ddot{U}$  نشان دهنده سرعت و  $\dot{U}$  بیانگر شتاب در هر حالت خواهد بود. در بعضی نقاط حین نفوذ، سرعت انتهای پرتابه معادل با سرعت مقطع قارچی شکل که در سرامیک نفوذ کرده است می‌شود. در این نقطه فرض می‌شود که پرتابه یک جسم صلب باشد. جرم پرتابه در این حالت با  $\rho_P A_0 L_{ERO}$  مشخص می‌شود. قانون دوم نیوتن معادلات زیر را برای نیروهای عمل کننده روی پرتابه صلب به دست می‌دهد:

$$F_I = -\ddot{U}_P \cdot \rho_P \cdot L_{ERO} \cdot A_0 \quad (9)$$

این در حالی است که در مدل وود وارد [۲] نیروی  $F_I$  تنها بصورت معادله (۳) تعریف می‌شود.

ب مدل ارائه شده توسط وود وارد درحقیقت برای پرتابه‌های سرتخت بوده، درحالیکه بیشتر پرتابه‌های واقعی بصورت اجیوال هستند. در اصلاحی دیگر این حالت برای پرتابه‌های اجیوال نیز بسط داده شده است، بدین صورت که می‌توان یک قطر معادل

( $D_{eq}$ ) و به دنبال آن یک طول معادل ( $L_{eq}$ ) برای پرتابه تعریف کرد (شکل ۳-).



شکل (۳) پرتابه اجیوال.

بنابراین:

$$D_{eq} = \frac{\int_0^{L_p} D^3(z) dz}{\int_0^{L_p} D^2(z) dz} \quad (10)$$

$$L_{eq} = \frac{4Mp}{\pi D_{eq}^2 \cdot \rho_p} \quad (11)$$

که  $L_p$  طول واقعی پرتابه و  $D(z)$  قطر آن در هر موقعیت ( $z$ ) است. رابطه (۱۱) همان رابطه جرم، دانسیته، حجم است. ج - اصلاح بعدی که در مدل وود وارد [۲] انجام خواهد گرفت، تغییرات در زاویه  $\phi$  (نیمه زاویه مخروط تشکیل شده در اثر برخورد) است.

در اثر برخورد پرتابه به سرامیک ها، بخاطر رفتار ترد آنها، مخروطی با زاویه راس  $2\phi$  تشکیل می شود. طبق تحقیقات وود وارد چون زاویه  $\phi$  در برخوردهای مختلف (بستگی به سرعت برخورد) متفاوت خواهد بود، برای سادگی، زاویه  $\phi$  تشکیل شده در حالت کواسی استاتیک در نظر گرفته شده که در حدود ۶۸ درجه است. همچنین طبق بررسی های زائرا زاویه  $\phi$  به پارامترهای مختلفی از جمله سرعت برخورد بستگی دارد. طبق تئوری زائرا زاویه  $\phi$  بین ۲۰ تا ۳۰ درجه متغیر در نظر گرفته شده است.

در مدل فلورنس [۱] که اولین مدل تحلیلی ارائه شده در این زمینه است، زاویه  $\phi$  ثابت و برابر ۶۳ درجه لحاظ شده است. فلوز [۵] نیز در مدلی که ارائه داد برای تعیین زاویه  $\phi$  از یک رابطه خطی استفاده کرده است. در این رابطه که زاویه  $\phi$  تنها به سرعت بستگی دارد، با افزایش سرعت این زاویه از حداقل ۳۴ تا حداکثر ۶۸ درجه افزایش می یابد.

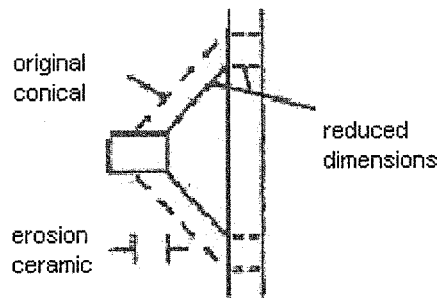
$$\Phi = \left( \frac{U_p - 220}{780} \right) \frac{34\pi}{180} + \frac{34\pi}{180} \quad (12)$$

حال با توجه به نظریه های متفاوت در این مورد و با توجه به اینکه به طور طبیعی در سرعت های برخورد بالا چون انرژی برخورد پرتابه زیاد است بنابراین نیروی سطح مشترک پرتابه - هدف ( $F_I$ ) از تنش فرسایشی سرامیک فراتر می رود و بنابراین موجب فرسایش سرامیک و نفوذ پرتابه به داخل سرامیک می شود. در محاسبات وود وارد [۲] فرسایش سرامیک و پرتابه، هر دو در نظر گرفته می شود و این باعث نزدیک شدن نتایج تئوری به یافته های تجربی می گردد. در حقیقت اگر فرسایش سرامیک لحاظ نشود و رفتار سرامیک حین برخورد صلب در نظر گرفته شود، نتایج تئوری از تجربه فاصله خواهد گرفت. با توجه به شکل ۴-، در مدل وود وارد [۲] زمانی که فرسایش سرامیک اتفاق می افتد، ابعاد موثر مخروط شکل یافته

کاهش می‌یابد. در حقیقت متناسب با فرسایش سرامیک، مخروط‌های سرامیکی جدید با ابعاد کوچکتر تشکیل می‌شوند. حال چونکه طبق رابطه محاسبه کار:

$$W = \pi b h Y_T (2/3 b + 1/2 h) \quad (13)$$

(که  $b$  اندازه قاعده و  $h$  تغییرات فاصله در مرکز صفحه است)، قطر قاعده مخروط در محاسبه کار لازم جهت بشقابی کردن و سوراخ کردن صفحه پستی موثر است، پس با کاهش قطر قاعده مخروط کار لازم جهت بشقابی کردن ماده پستی نیز کمتر خواهد شد و این یعنی مصرف انرژی کمتر از طرف پرتابه و در نتیجه حد بالستیک کمتر خواهد شد. حال از طریقی دیگر می‌توان در سرعت‌های برخورد بالاتر، قطر این قاعده مخروط را کوچکتر فرض کرد و در نتیجه کار لازم جهت بشقابی کردن صفحه پستی نیز کمتر خواهد شد.



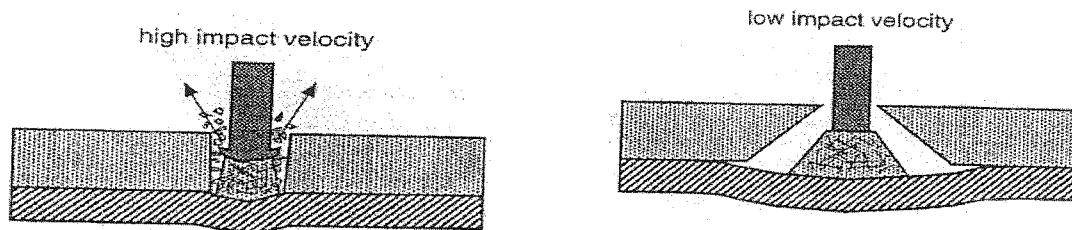
شکل (۴) شکل یافتن مخروط سرامیکی جدید در اثر فرسایش.

یکی از این راه‌ها تغییرات در زاویه  $\varphi$  در سرعت‌های بالاست به نحوی که مخروط سرامیکی کوچکتر شود. پس می‌توان یک زاویه  $\varphi$  را بر حسب سرعت برخورد تقریب زد. در مدل اصلاحی این مقاله این زاویه در تمامی سرعت‌های برخورد بین ۶۸ درجه (مدل وود وارد) و ۶۳ درجه (مدل فلورنس) بطور خطی بصورت زیر تقریب زده شده است:

$$\varphi = \frac{\pi}{180} \left[ \frac{5}{300} (900 - \dot{U}_P) + 63 \right] \quad (14)$$

به بیان دیگر برای سرعت برخوردهای کمتر از ۶۰۰ m/s زاویه  $\varphi$  همان ۶۸ درجه و بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ متر بر ثانیه این زاویه با رابطه بالا به صورت خطی و در سرعت‌های بالاتر از ۹۰۰ متر بر ثانیه با مقدار ۶۳ درجه تقریب زده می‌شود. در حقیقت در این تقریب خطی با افزایش سرعت برخورد زاویه  $\varphi$  در یک محدوده به صورت خطی کاهش می‌یابد و این با توجه به توضیحات قبلی نتایج تئوری را به یافته‌های تجربی با توجه به دلایل ذکر شده نزدیک می‌کند. تحقیقات دیگر محققین نیز مؤید این رابطه است.

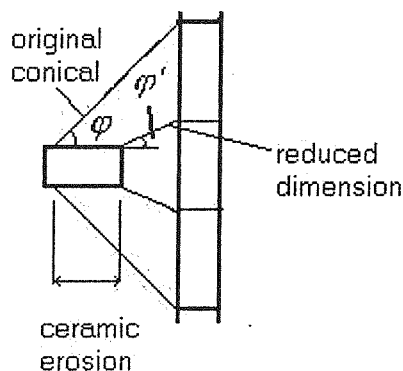
لازم به ذکر است که زائرا [۴] در تحقیقی نشان داد که با افزایش سرعت برخورد، قسمت تخریب شده حول ناحیه برخورد بیشتر مخروط سرامیکی کوچکتر با زاویه کمتری تشکیل می‌شود و این نیز می‌تواند صحت رابطه تعیین شده برای زاویه  $\varphi$  را تأیید کند. شکل ۵- گویای این مطلب است.



شکل (۵) تغییرات زاویه  $\phi$  در سرعت‌های برخورد متفاوت.

د. آخرین اصلاحی که در این مدل انجام شده، در راستای مورد (ج) و تغییرات در زاویه  $\phi$  است. همان طور که گفته شد در مدل وود وارد [۲] زمانی که فرسایش سرامیک اتفاق می‌افتد، ابعاد موثر مخروط شکل، یافته کاهش می‌یابد (شکل ۶-۴) که البته اضلاع مخروط‌های جدید با مخروط اولیه موازی در نظر گرفته شده است به عبارتی زاویه  $\phi$  مخروط‌های جدید حفظ می‌شود.

حال اگر این زاویه در مخروط جدید ثابت فرض نشود و کمتر از مقدار اولیه در نظر گرفته شود (به عبارتی مخروط‌های جدید اضلاعشان دیگر موازی اضلاع مخروط‌های قبلی نخواهد بود) باز بدلیل مورد (ج) مدل به آنچه در تجربه و واقعیت وجود دارد نزدیکتر می‌شود.



شکل (۶) کاهش زاویه مخروط در یک برخورد.

این تغییرات زاویه  $\phi$  را در یک برخورد به صورت خطی تقریب زده به این صورت که:  
 \* در حالتی که فرسایش در سرامیک وجود ندارد زاویه  $\phi$  همان مقدار ماکزیمم خود  
 \* و در حالت بیشترین فرسایش ممکن (یعنی تمام ضخامت سرامیک) زاویه  $\phi$  را ۳۴ درجه (کمترین مقدار در مدل فلوز) در نظر گرفته می‌شود.  
 پس یک رابطه خطی برحسب فرسایش سرامیک برای این زاویه تعیین می‌شود:

$$\phi(x) = \frac{\pi}{180} \left[ \frac{\phi_0 - 34}{t_c} (t_c - x) + 34 \right] \quad (15)$$

که  $x$  میزان فرسایش سرامیک و  $t_c$  ضخامت سرامیک و  $\phi_0$  زاویه نیمه مخروط اولیه (که با توجه به مورد (ج) تعیین می‌شود) است.

به بیان دیگر در یک برخورد، علاوه بر آن که با توجه به مورد (ج) یک زاویه  $\phi$  مشخص با در نظر گرفتن سرعت برخورد تعیین می‌شود در همان برخورد و در فاصله زمانی‌های پس از برخورد نیز این زاویه در صورت فرسایش سرامیک تغییر خواهد کرد.

## نتایج و بحث

همان طور که اشاره شد در تئوری وود وارد [۲] برای پرتابه تنها فرسایش لحاظ شده است. در مدل اصلاحی ارائه شده در این پژوهش سه حالت فرسایش، قارچی شکل و حالت صلب پرتابه در نظر گرفته شده است. در عمل هم این چنین اتفاق می افتد یعنی پرتابه در اثر انرژی و سرعت برخورد زیاد و به خاطر اینکه نیروی سطح مشترک پرتابه - سرامیک بیش از تنش فرسایشی پرتابه است، فرسایش می یابد و با پیشرفت و نفوذ پرتابه در هدف از این نیروی سطح مشترک کاسته می شود. این فرسایش تا جایی که سرعت پرتابه به زیر سرعت پلاستیک برسد ادامه می یابد و از این لحظه به بعد پرتابه به فاز قارچی شکل می رود که البته این فاز از لحاظ زمانی بسیار کوتاه است. زائرا [۴] نیز این مورد را در تحقیقات خود بیان کرده است. به مجرد اینکه نیروی سطح مشترک از نیروی فرسایش پرتابه کمتر شود، پرتابه حالت صلب به خود می گیرد و دیگر فرسایش و کاهش جرم نخواهد داشت.

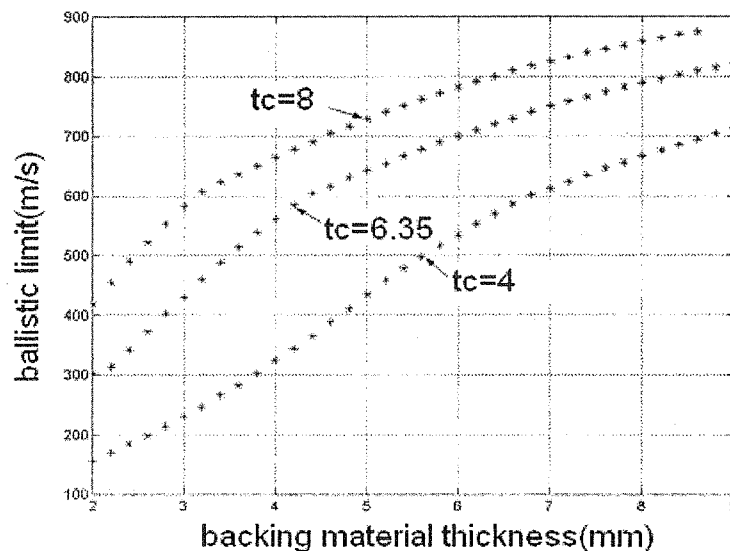
از آنجا که در این مدل در هر برخورد خاص، در صورت فرسایش سرامیک، کاهش زاویه  $\phi$  لحاظ شده است، در نتیجه کاهش ابعاد مخروط و در نتیجه کاهش نیروی لازم برای بشقابی کردن و سوراخ کردن صفحه پستی را به همراه دارد و این حد بالستیک کمتر را نتیجه می دهد و ما را به تجربه نزدیکتر می کند. در حقیقت این اصلاح همان اثر و نتیجه لحاظ کردن فرسایش پرتابه و سرامیک را در مدل تحلیلی وود وارد [۲] در بر دارد.

لازم به ذکر است که در اصلاحات انجام گرفته در این مدل، تغییرات در زاویه  $\phi$  بیشترین تأثیر و در نظر گرفتن حالت اجیوال برای پرتابه کمترین تأثیر را بر بهبود نتایج مدل تحلیلی داشته است.

برای بررسی تأثیر ضخامت ماده پستی در نفوذ، سرعت حد بالستیک برای اهداف سرامیکی - فلزی با ماده پستی آلومینیم و با ضخامت های متفاوت توسط تئوری های مختلف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده اند.

در نمودار شکل ۷ - تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب تغییرات در ضخامت ماده پستی برای ضخامت های سرامیک مختلف (که در نمودار مشخص است) رسم شده است.

در این برخوردها، پرتابه از جنس فولاد سخت با سختی R60 و با قطر ۷/۶۲ میلی متر و جرم ۸/۳ گرم به هدف سرامیکی - فلزی که سرامیک روئی آلومینا ( $Al_2O_3$ ) با درجه خلوص ۸۵٪ (AD85) و ضخامت های مشخص شده در شکل است و همچنین ماده پستی آلومینیم Al2024 با ضخامت متغیر می باشد، برخورد می کند.



شکل (۷) تغییرات حد بالستیک بر حسب ضخامت ماده پستی در سه ضخامت سرامیک (۶/۳۵ و ۸ و ۱۰ میلی متر).

همان طور که شکل ۸ نشان می دهد با افزایش ضخامت ماده پستی، در هر ضخامت سرامیکی، سرعت حد بالستیک افزایش می یابد. ضخامت ماده پستی حدوداً بین ۲ تا ۹ میلی متر در نظر گرفته شده است.

معمولاً اهداف با ضخامت های در حدود قطر پرتابه، رفتار اهداف با ماده پستی نازک از خود نشان می دهند و بیش از آن

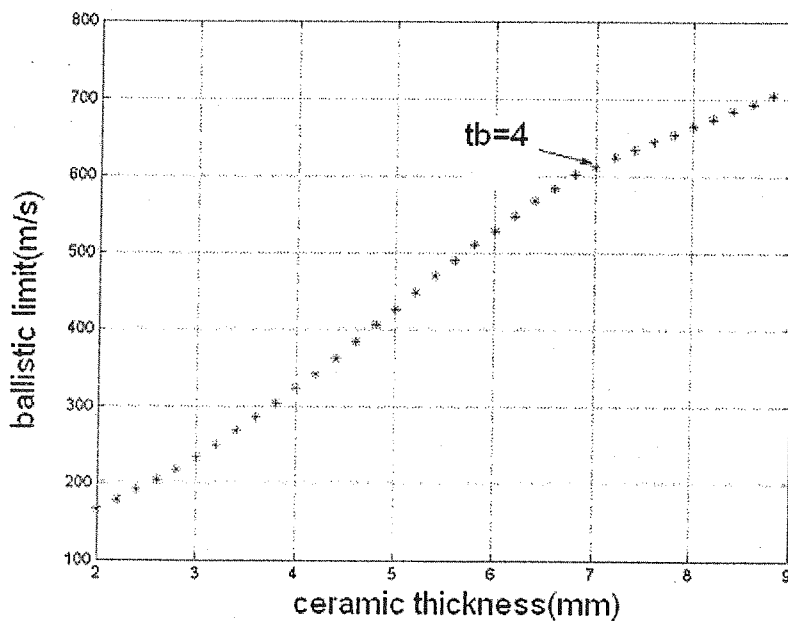


جزء اهداف با ماده پستی ضخیم به حساب می آیند. [۲]. شکل ۸- نیز نمودار تغییرات سرعت حد بالستیک را بر حسب ضخامت سرامیک برای ضخامت ماده پستی ۴ میلی متر نشان می دهد. این نمودار نیز چنین نشان می دهد که با افزایش ضخامت سرامیک، سرعت حد بالستیک افزایش می یابد. لازم به ذکر است که افزایش ضخامت سرامیک، سرعت حد بالستیک را بیشتر افزایش می دهد تا اینکه ضخامت ماده پستی به همان اندازه افزایش یابد.

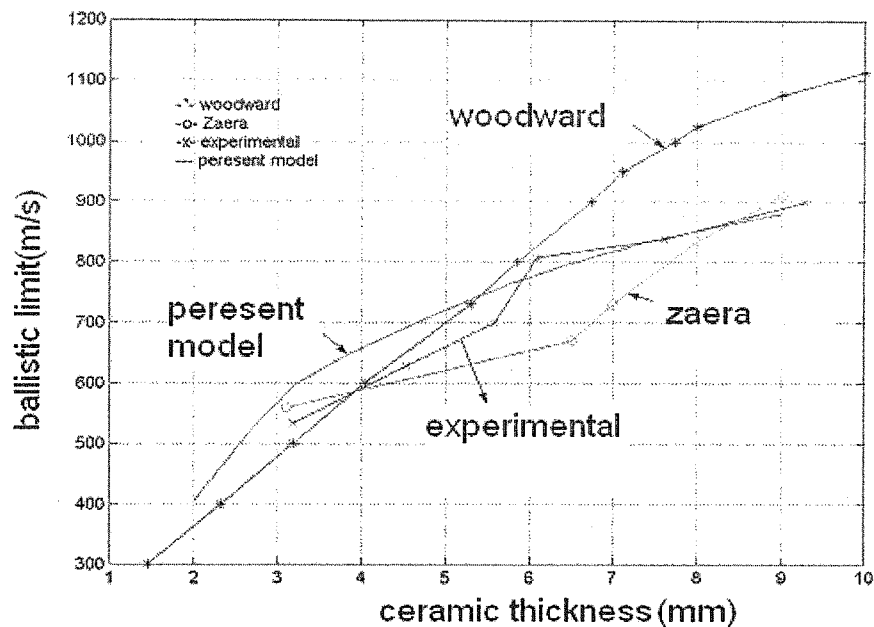
اکنون برای مقایسه این یافته ها با نتایج دیگر تئوری ها در این زمینه و همچنین مقایسه با یافته های تجربی، نمودارها و جداولی در ادامه خواهد آمد. در شکل ۹- نتایج مدل اصلاحی ارائه شده در این تحقیق با نتایج مدل تحلیلی وود وارد [۲] و زائر [۴] و همچنین با نتایج تجربی ویلکینز [۲۱] مقایسه شده است.

این نمودار سرعت حد بالستیک پرتابه فولادی با قطر ۷/۶۲ میلی متر و جرم ۸/۳ گرم را که به هدفی سرامیکی از جنس آلومینا AD85 با ضخامت ۷/۸۵ میلی متر و ماده پستی آلومینیم برخورد می کند بر حسب ضخامت ماده پستی نشان می دهد. همان طور که این نمودار نشان می دهد در بیشتر نقاط دقت پیش بینی مدل ارائه شده در این مقاله از مدل تحلیلی وود وارد بیشتر است. نکته جالبی در نتایج تجربی ویلکینز در این نمودار قابل مشاهده است و آن اینکه یک پله در منحنی تجربی وجود دارد. به بیان دیگر نمودارهای تجربی یک خط راست نیستند. این موضوع را چنین می توان توجیه کرد که:

با افزایش ضخامت ماده پستی دو حالت پتالینگ و پلاگینگ رخ می دهد. در حقیقت تا ضخامت حدود ۵ میلی متر (ماده پستی) تقریباً رفتار ماده پستی نازک بر مسئله حاکم است و حالت پتالینگ و بشقابی شدن ماده پستی به وجود می آید و از ضخامت ۵ میلی متر به بعد هدف، رفتار ماده پستی ضخیم را از خود نشان می دهد و حالت پلاگینگ یا کنده شدن و برش خوردن یک تکه از ماده پستی (در ناحیه پشت پرتابه) به وجود می آید. در حالت پلاگینگ یک تکه تحت اثر نیروهای برشی بوجود آمده در اثر نیروهای وارده ناشی از برخورد، از ماده پستی جدا می شود و به همراه پرتابه از هدف خارج می گردد. جهت روشن تر شدن دقت مدلها و میزان خطای آنها در مقایسه با نتایج تجربی، جداول ۱ و ۲ بخشی از نتایج این مدل اصلاحی را با نتایج تجربی و تئوری وود وارد [۲] مقایسه کرده است. در این جداول خطای مدل اصلاحی ارائه شده در این تحقیق و همچنین خطای مدل تحلیلی وود وارد [۲] با نتایج تجربی ویلکینز [۲۱] مقایسه شده است. مشخصات زرهی در این جداول آمده است. جدول ۱- سرعت حد بالستیک را بر حسب ضخامت ماده پستی نشان می دهد. همان طور که این جدول نشان می دهد خطای مدل ارائه شده در این پژوهش در بیشتر نقاط از خطای مدل تحلیلی وود وارد [۲] کمتر بوده و نفوذ را با دقت بیشتری پیش بینی می کند.



شکل (۸) تغییرات حد بالستیک بر حسب ضخامت سرامیک.



شکل (۹) مقایسه نتایج مدل تحلیلی ارائه شده با نتوری Woodward [۲] و Zaera [۴] و نتایج تجربی Wilkins [۲۱].

جدول (۱) پرتابه فولادی با قطر ۷/۶۲ mm و جرم ۸/۳gr به صفحه سرامیکی از جنس آلومینا AD85 با ضخامت  $t_c=۸/۶۴$  mm و ماده پستی آلومینیم Al-T6061 با ضخامت متغیر برخورد می کند.

خطای مدل اصلاحی (%)	خطای مدل woodward (%)	حد بالستیک مدل اصلاحی (m/s)	حد بالستیک مدل woodward (m/s)	حد بالستیک تجربی (m/s)	ضخامت ماده پستی (mm)
۵	۱۳/۳	۷۴۸	۸۰۰	۷۰۶	۴/۹
۶	۶/۸	۷۸۶	۹۰۰	۸۴۲	۵/۶
۶	۱۱/۸	۸۱۴	۹۷۵	۸۷۲	۶/۱۶
۷	۷/۲	۹۰۰	۱۰۴۰	۹۷۰	۸/۳
۹	۴/۲	۹۲۶	۱۰۷۰	۱۰۲۷	۹/۲۰

خطای مدلها در مقایسه با نتایج تجربی محاسبه شده اند

در جدول (۲) تأثیر ضخامت سرامیک در نفوذ نشان داده شده است. در این جدول تغییرات سرعت حد بالستیک با افزایش ضخامت سرامیک رویی تعیین شده و همانطور که از این جدول مشخص است با افزایش ضخامت سرامیک رویی (همانند ماده پستی) سرعت حد بالستیک افزایش می یابد. خطای این مدل نیز در مقایسه با تجربه محاسبه شده است.

جدول (۲) پرتابه فولادی با قطر ۷/۶۲ mm و جرم ۸/۳ gr به صفحه سرامیکی از جنس آلومینا AD85 با ضخامت متغیر و ماده پستی آلومینیم Al-T6061 با ضخامت  $t_p=۶/۳۵$  mm برخورد می کند.

خطای مدل اصلاحی (%)	حد بالستیک مدل اصلاحی (m/s)	حد بالستیک تجربی (m/s)	ضخامت سرامیک (mm)
۱۱	۴۷۴	۴۲۶	۳/۱۷
۱۰	۷۱۰	۶۴۰	۶/۲۵
۹/۵	۷۸۶	۷۱۰	۷/۸۵

\*خطای مدلها در مقایسه با نتایج تجربی محاسبه شده اند

در ادامه به بررسی تاثیر دو پارامتر مهم در نفوذ، یکی سختی سرامیک و دیگری سطح مقطع پرتابه، پرداخته شده است.

## تأثیر سختی سرامیک

از جمله پارامترهای مهم و موثر در نفوذ، سختی سرامیک رویی در اهداف کامپوزیتی سرامیکی است. طبق تحقیقات انجام گرفته، افزایش سختی سرامیک، افزایش مقاومت به نفوذ هدف را بدنبال دارد. برای مقایسه این پارامتر، دو نوع سرامیک مختلف، آلومینا AD85 با سختی ۹۰۰۰ Mpa و سرامیک برون کارباید (B<sub>4</sub>C) با سختی ۲۹۰۰۰ Mpa در دو برخورد یکسان مورد مطالعه قرار گرفتند. طبق تئوری اصلاحی ارائه شده و همچنین تئوری وود وارد [۲] 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 B<sub>4</sub>C بیشتر بوده و سرعت حد بالستیک در این حالت بیشتر خواهد بود. اما زمانی که انرژی و سرعت برخورد پرتابه به اندازه ای نباشد که فرسایش سرامیک را موجب شود، آنگاه استفاده از سرامیک آلومینا AD85 و یا B<sub>4</sub>C تفاوت چندانی در مقاومت به نفوذ هدف نخواهد داشت. پس آنچه در اینجا مهم است این است که سختی سرامیک در حالت فرسایش سرامیک موثر واقع می شود.

## تأثیر قطر (سطح مقطع) پرتابه

قطر پرتابه از جمله پارامترهای مهم و موثر در نفوذ است. افزایش قطر پرتابه افزایش سطح مقطع برخورد را در پی دارد و این عامل در سرامیک ها که ترد هستند و رفتار شکننده از خود نشان می دهند باعث کاهش سرعت حد بالستیک می شود. به بیان دیگر به خاطر تردی سرامیک هر چه سطح مقطع برخورد بیشتر باشد، سطح بیشتری از سرامیک در لحظه اولیه برخورد شکسته می شود و در نتیجه نفوذ پرتابه را آسانتر می سازد.

مقایسه قابلیت نفوذ پرتابه های سرتخت و نوک تیز (اجیوال) در سرامیک ها را نیز می توان همین جا مطرح کرد. پرتابه های نوک تیز حد بالستیک بیشتری نسبت به پرتابه های سر تخت دارند. این پدیده را چنین می توان توجیه کرد که در حالتی که سرعت و انرژی برخورد پرتابه به سرامیک یکسان باشد، در لحظه برخورد، پرتابه سرتخت سطح بیشتری را نسبت به پرتابه نوک تیز می پوشاند (در حقیقت پرتابه سر تخت سطحی به اندازه سطح مقطع پرتابه و پرتابه نوک تیز در حد یک نقطه) و چون سرامیک ترد است و رفتار شکننده در برابر برخورد از خود نشان می دهد بنابراین در برخورد پرتابه سرتخت سطح تخریب شده و سطحی که شکسته می شود بیشتر است و در نتیجه حد بالستیک کمتر خواهد بود.

لازم به ذکر است که این حالت تنها برای سرامیک و بطور کلی اهداف ترد صادق است و برای اهداف نرم مثل فلزات عکس این موضوع صادق خواهد بود.

## شبیه سازی فرآیند نفوذ

با استفاده از روابط بدست آمده از مدل ارائه شده در این مقاله و برای نشان دادن فرآیند نفوذ شبیه سازی کامپیوتری از این فرآیند ارائه شده است.

در حقیقت تمام اتفاقاتی که حین نفوذ پرتابه به داخل یک کامپوزیت سرامیکی اتفاق می افتد، شبیه سازی شده است.

این اتفاقات شامل:

- ۱- نحوه ترک خوردن اولیه سرامیک (بصورت مخروطی)
- ۲- ایجاد مخروط سرامیکی اولیه (طبق روابط موجود در مدل اصلاحی ارائه شده و تمام مدل های تحلیلی موجود در این زمینه و همچنین اتفاقاتی که در عمل، حین برخورد، اتفاق می افتد و بیشتر آنها در مدل های تجربی آمده است).

۳- تغییر ابعاد مخروط ایجاد شده بسته به میزان نفوذ پرتابه.

که تغییرات زاویه مخروط شامل دو بخش:

- تغییرات زاویه مخروط بسته به سرعت اولیه

- تغییرات زاویه مخروط بسته به میزان نفوذ

۴- نحوه تغییر شکل پرتابه (در حقیقت در این مدل پرتابه قابل تغییر شکل در نظر گرفته شده است) که بسته به سرعت پرتابه شامل حالت‌های فرسایش، قارچی شکل و صلب است.

۵- کاهش طول پرتابه

۶- کاهش جرم پرتابه

۷- نهایتاً تعیین توقف یا خروج پرتابه

تمام موارد فوق با کمک گرفتن و استفاده از:

الف - مدل اصلاحی ارائه شده در این مقاله و روابط حاکم بر آن

ب - مدل های تحلیلی ارائه شده دیگر محققین برای ماده پستی نازک

ج - نتایج و مشاهدات تجربی برخورد پرتابه.

انجام شده و در شبیه‌سازی کامپیوتری لحاظ شده است.

بنابراین با در نظر گرفتن تمام حالات فوق، برنامه کامپیوتری نفوذ با استفاده از محیط برنامه نویسی مطلب بصورت یک کد کامپیوتری نوشته شده است.

در حقیقت تمام تغییر شکل های پرتابه و سرامیک از ابتدای برخورد تا هنگام توقف و یا خروج پرتابه در هر لحظه زمانی نشان داده شده است.

در این بخش با محاسبه سرعت حد بالستیک یک هدف خاص، مشخص می‌شود که آیا پرتابه در هدف نفوذ می‌کند یا خیر. در صورت نفوذ کامل و خروج پرتابه از هدف، این حالت با شکست ماده پستی و خروج پرتابه نشان و در صورت توقف پرتابه در هدف، میزان و نحوه تغییر شکل و میزان نفوذ در شبیه‌سازی نشان داده خواهد شد. در حقیقت با هر اجرا از برنامه و با ورودی های متفاوت، شبیه‌سازی متفاوت خواهد بود.

در شکل های (۱۰) و (۱۱) دو نمونه از شبیه‌سازی در دو حالت توقف و خروج پرتابه نشان داده شده که مقدار سرعت حد بالستیک نیز در هر حالت محاسبه و مشخص می‌شود.

## نتیجه گیری

طبق مطالعات انجام گرفته در این تحقیق می‌توان چنین نتیجه گرفت که:

۱- مدل اصلاحی ارائه شده در این تحقیق می‌تواند جهت پیش بینی نفوذ در سرامیک ها با دقت خوب و همچنین طراحی اهداف سرامیکی مقاوم به نفوذ و ضدگلوله مورد استفاده قرار گیرد و در مقایسه با نتایج تجربی هم خوانی خوبی نشان می‌دهد.

۲- خواص مهم سرامیک ها که در جلوگیری از نفوذ تاثیر به سزایی دارد، شامل استحکام فشاری و سختی بالا، چقرمگی شکست و اصطکاک ذرات سرامیک خرد شده است.

۳- افزایش ضخامت سرامیک و ماده پستی، افزایش سرعت حد بالستیک را به همراه دارد. در حقیقت افزایش ضخامت های سرامیک و ماده پستی افزایش مقاومت به نفوذ هدف را موجب می‌شود.

۴- تا زمانی که سرامیک فرسایش نیابد، میزان سختی سرامیک رویی در مقاومت به نفوذ هدف تاثیر آنچنانی ندارد ولی در صورت فرسایش سرامیک، با افزایش سختی سرامیک سرعت حد بالستیک هدف افزایش خواهد یافت.

۵- کاهش زاویه  $\varphi$  در یک برخورد خاص، به خاطر اینکه ابعاد موثر مخروط تشکیل شده را کاهش می‌دهد میزان کار لازم جهت بشقابی کردن و سوراخ کردن ماده پستی را کاهش و در نتیجه سرعت حد بالستیک کمتر را نتیجه می‌دهد.

۶- نیروی سطح مشترک پرتابه - سرامیک پس از برخورد پرتابه (بخاطر انرژی و سرعت بالا) از نیروی فرسایشی پرتابه بیشتر

است و فرسایش پرتابه را موجب می‌شود. حین نفوذ پرتابه، نیروی سطح مشترک کاهش می‌یابد تا جایی که از نیروی فرسایشی پرتابه کمتر می‌شود و بنابراین پرتابه در این حالت صلب خواهد شد. در بین این دو حالت نیز حالت قارچی شکل پرتابه قرار دارد. در نظر گرفتن سه فاز فرسایش، قارچی شکل و صلبیت پرتابه، ما را به آنچه در عمل اتفاق می‌افتد نزدیکتر می‌کند و دقت پیش بینی نفوذ را بیشتر می‌کند. البته فاز قارچی شکل از لحاظ زمانی کوتاه است.

۷- در مدل اصلاحی ارائه شده، تغییرات در زاویه  $\Phi$  بیشترین تأثیر و در نظر گرفتن حالت اجیوال برای پرتابه کمترین تأثیر را بر بهبود نتایج و افزایش دقت مدل دارد.

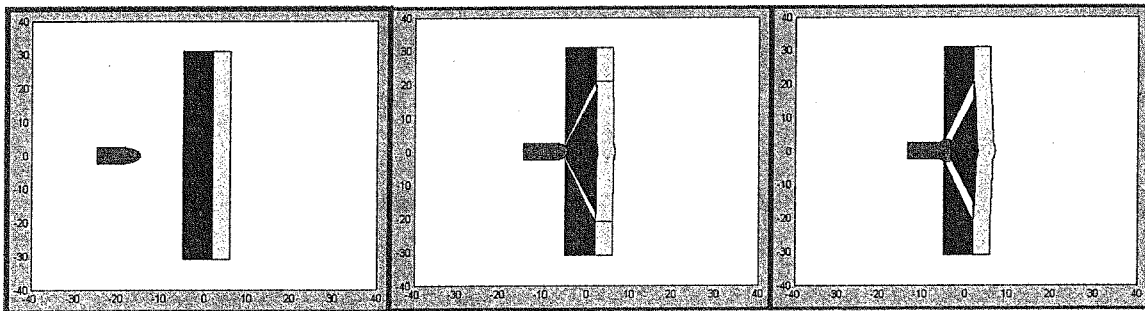
## فهرست علائم اختصاری

$M_p$ - جرم پرتابه	$U_C$ - شتاب سرامیک
$F_p$ - نیروی فرسایشی پرتابه	$U_p$ - سرعت پرتابه
$F_C$ - نیروی فرسایشی سرامیک	$U_p$ - شتاب پرتابه
$F_I$ - نیروی سطح مشترک پرتابه و سرامیک	$A_0$ - سطح مقطع پرتابه
$F_T$ - نیروی وارد بر ماده پشتی	$L_{EQ}$ - طول معادل پرتابه
$\Delta M_p$ - کاهش جرم پرتابه	$D_{EQ}$ - قطر معادل پرتابه
$\Delta M_C$ - کاهش جرم سرامیک	$\Phi$ - نیمه زاویه راس مخروط
$U_C$ - سرعت سرامیک	$L_{ERO}$ - طول فرسایش یافته

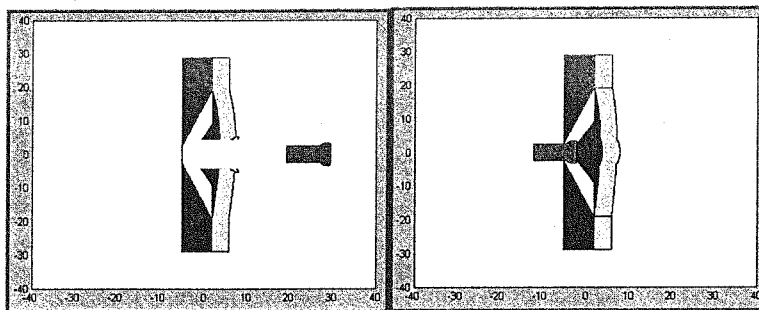
## زیر نویس ها

- 1-Woodward
- 2-Felorence
- 3-woodward
- 4-Den Reijer
- 5-Zaera
- 6-Lumped mass

- 7-quasi-static
- 8-Woodward
- 9-dishing
- 10-Wilkins
- 11-petaling
- 12-plugging



شکل (۱۰) شبیه سازی مراحل توقف در هدف سرامیکی



شکل (۱۱) شبیه سازی مراحل نفوذ در هدف سرامیکی.