



تحلیل صفحات دو لایه سرامیک- کامپوزیت تحت ضربه بالستیک عمودی پرتابه های استوانه‌ای

در این مقاله برخورد و نفوذ پرتابه های استوانه‌ای به صفحات دو لایه سرامیک - کامپوزیت مدلسازی و تحلیل گردیده است برای مدلسازی و تحلیل سرامیک از روش تحلیلی *Chocron and Galvez* استفاده شده و روش محاسبه نیم زاویه مخروط سرامیکی حین نفوذ اصلاح گردیده است. همچنین برای تحلیل ماده کامپوزیت تئوری انتشار موج تنش در الیاف بکار رفته و رابطه تنش - کرنش الیاف با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش اصلاح گردیده است. براساس قانون بقای انرژی، میزان کاهش انرژی جنبشی پرتابه در حین نفوذ به کامپوزیت برابر میزان انرژی جنبشی و انرژی کرنشی جذب شده توسط کامپوزیت در نظر گرفته شده است. نتایج مدل تحلیلی جدید با نتایج عددی و تحلیلی *Chocron and Galvez* مقایسه شده و مشاهده گردیده که دقت مدل جدید در محاسبه سرعت و طول باقیمانده پرتابه بهتر از روشهای تحلیلی قبلی می باشد.

سعید فعلی^۱

استادیار

محمدحسین یاس^۲

دانشیار

محمد رضا عسگری^۳

کارشناس ارشد

واژه‌های راهنما: سرامیک، کامپوزیت، نفوذ عمودی، پرتابه، هدف

۱- مقدمه

امروزه مواد دو لایه غیر فلزی سرامیک - کامپوزیت بطور وسیع و گسترده‌ای بعنوان محافظ شخصی در جلیقه ها و کلاه خودهای ضد گلوله بکار می رود. سرامیک به علت داشتن دانسیته پایین و استحکام بالا بعنوان صفحه جلویی و کامپوزیتی بعلت انعطاف پذیری مناسب به عنوان ماده پشتیبان استفاده می شود. وظیفه سرامیک فرسایش و کاهش سرعت پرتابه بوده و کامپوزیت انرژی جنبشی قطعات خرد شده را جذب می کند و مانع عبور آنها می شود.

از آنجائیکه مدل کردن تحلیلی رفتار اینگونه اهداف بسیار پیچیده است اکثر کارهای انجام شده بصورت مطالعه تجربی یا عددی بوده و مدلسازی تحلیلی این فرآیند بصورت محدود انجام شده است.

Florence [۱] مدلی تحلیلی برای تعیین سرعت حد بالستیک اهداف دو لایه سرامیک- فلز ارائه نمود. این مدل بر این اساس ارائه شده بود که سرامیک نیروی حاصل از برخورد پرتابه را روی یک ناحیه وسیع پخش کرده و ماده پشتیبان انرژی جنبشی پرتابه را بعد از برخورد پرتابه جذب می کند.

۱ نویسنده مسئول، استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی کرمانشاه Felisaeid@razi.ac.ir

۲ دانشیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی کرمانشاه Yas@razi.ac.ir

۳ کارشناس ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی کرمانشاه 864.asgari@gmail.com

Den Reijer [۲] مدل تحلیلی بر اساس روش جرم فشرده ارائه نمود و با استفاده از یک دسته معادلات در هر لحظه زمانی سرعت و جرم پرتابه را محاسبه نمود.

Hetherington [۳] مدل تحلیلی را برای محاسبه نسبت ضخامت بهینه در سپرهای ترکیبی که ماده رویی آن از جنس سرامیک می باشد ارائه کرد .

مدل تحلیلی دیگری توسط Zaera و Sanchez Galvez [۴] ارائه گردید که فرآیند نفوذ در سرامیک را قبل از تشکیل مخروط سرامیکی در اهداف دو لایه سرامیک- فلز (آلومینیوم) با دقت خوبی پیش بینی می کند. این مدل تحلیلی توسط فعلی و همکاران [۵] بر اساس تغییر در زاویه مخروط سرامیکی و در نظر گرفتن تغییر شکل پرتابه حین نفوذ اصلاح گردید.

تنها مدل تحلیلی که منحصراً ضربه به اهداف دو لایه سرامیک- کامپوزیت را بصورت تحلیلی بررسی نموده است توسط Chocron and Galvez [۶] ارائه شد. در این مدل فرآیند نفوذ به دو مرحله تقسیم شده که مرحله اول شامل لحظه اصابت پرتابه به هدف تا لحظه تشکیل مخروط سرامیکی در پیشانی پرتابه و مرحله دوم شامل لحظه نفوذ پرتابه در مخروط سرامیکی تا لحظه توقف پرتابه در هدف یا شکست کامپوزیت پشتیبان می باشد. در این مدل تحلیلی برای توصیف رفتار پرتابه از معادله برنولی استفاده شده و زمان شکست سرامیک و تشکیل مخروط سرامیکی در انتهای فاز اول مطابق مدل Den Reijer [۲] در نظر گرفته شده است. مبنای شکست کامپوزیت نیز بر اساس انرژی جذب شده توسط آن می باشد.

Parameswaran و همکاران [۷] با انجام آزمایش به بررسی تغییرات زاویه مخروط سرامیکی که در محل برخورد پرتابه با سرامیک ایجاد می شود، پرداختند.

Gu [۸] مدلی تحلیلی از نفوذ پرتابه در کامپوزیتها بر اساس انرژی جذب شده توسط الیاف اصلی و غیر اصلی با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش در رابطه تنش- کرنش الیاف ارائه نمود.

Shokrieh و Javadpoar [۹] شبیه سازی عددی از ضربه پرتابه به سپرهای سرامیک - کامپوزیت ارائه کردند . آنها در مدل خود یک هدف با ضخامت ثابت و بهینه که بر مبنای روش حل Hetherington [۳] بدست آمده بود، مورد مطالعه قرار دادند .

در این مقاله مدل تحلیلی ارائه شده توسط Chocron and Galvez [۶] برای شبیه سازی نفوذ پرتابه های استوانه ای در اهداف دو لایه سرامیک- کامپوزیت اصلاح گردیده و مدل جدیدی ارائه شده است که نتایج را با دقت مناسبتری ارائه می دهد. در مدل تحلیلی جدید برای شبیه سازی رفتار سرامیک و پرتابه از مدل Chocron and Galvez [۶] استفاده شده و یک رابطه جدید برای تعیین نیم زاویه مخروط سرامیکی در لحظه برخورد و میزان تغییرات آن در طی نفوذ، ارائه گردیده است. همچنین برای شبیه سازی و تحلیل ماده کامپوزیت پشتیبان میزان جذب انرژی الیاف از مدل تحلیلی Gu [۸] که نفوذ پرتابه را در ماده کامپوزیتی به تنهایی مدل می کند، استفاده شده است. در این روش اثر نرخ کرنش در رابطه تنش- کرنش الیاف اصلاح گردیده است.

۲- مدل تحلیلی

فرضیات مدل بشرح زیر است:

- رفتار ماده پرتابه بصورت صلب کاملاً پلاستیک با تنش تسلیم دینامیکی Y_p و شکل هندسی استوانه‌ای در نظر گرفته شده است.
 - سرعت برخورد پرتابه در حدی است که باعث نفوذ پرتابه در سرامیک و کامپوزیت می‌شود.
 - شکست در سرامیک بصورت ایجاد ترک مخروطی و شکل‌گیری مخروط در فصل مشترک پرتابه سرامیک می‌باشد (شکل ۱).
 - ماده کامپوزیتی بصورت الیاف بافته شده در نظر گرفته شده و از انرژی صرف شده در لایه لایه شدن کامپوزیت صرف‌نظر شده است.
- مدل تحلیلی جدید در ۳ فاز بشرح زیر ارائه شده است:

فاز اول: برخورد پرتابه به رویه سرامیکی، شکل‌گیری مخروط و خرد شدن کامل آن
فاز دوم: نفوذ پرتابه به درون مخروط خرد شده سرامیکی
فاز سوم: نفوذ پرتابه یا مجموعه پرتابه و سرامیک به درون کامپوزیت پشتیبان

۲-۱- فاز اول

زمانی که سرامیک مورد اصابت پرتابه قرار می‌گیرد، به علت وجود آمدن موج تنش کششی می‌شکند و یک ترک مخروطی در محل فصل مشترک پرتابه - هدف و در ماده سرامیک شروع به شکل‌گیری و خرد شدن می‌کند. سرعت لحظه‌ای پرتابه $V(t)$ با استفاده از معادله حرکت برابرست با:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{Y_p}{\rho_p L_p} \quad (1)$$

نرخ کاهش طول پرتابه برابرست با:

$$\frac{dL_p}{dt} = -(V - \dot{x}) \quad (2)$$

که Y_p تنش تسلیم دینامیکی پرتابه، V سرعت پرتابه، \dot{x} سرعت ناحیه تماس پرتابه - سرامیک، ρ_p دانسیته پرتابه و L_p طول پرتابه می‌باشد با توجه به معادله Tate [۱۰] و Aleksevskii [۱۱] معادله انرژی در فصل مشترک پرتابه - سرامیک بصورت زیر است:

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

که در معادله فوق Y_{co} استحکام دینامیکی سرامیک سالم می‌باشد عمق نفوذ پرتابه در هدف نیز بصورت رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} \quad (4)$$

در معادله فوق \dot{x} سرعت ناحیه تماس پرتابه و سرامیک و x میزان نفوذ پرتابه در هدف است.

زمان انتهایی این فاز را بر اساس مدل Den Reijer [۲]، (h_c/c) که h_c ضخامت صفحه سرامیک و c سرعت موج تنش طولی در سرامیک می باشد، بر اساس معادله (۳) در حالتیکه استحکام دینامیکی سرامیک سالم بیشتر از تنش تسلیم دینامیکی پرتابه باشد، سرعت حدی وجود دارد که اگر سرعت پرتابه کمتر از این سرعت حدی باشد در فاز اول که سرامیک بیشترین استحکام را دارد هیچگونه نفوذی به درون آن صورت نمی گیرد و پرتابه ضمن متوقف شدن در پشت هدف فقط دچار کاهش سرعت و فرسایش می شود تا اینکه پس از خرد شدن کامل مخروط سرامیکی و کاهش مقاومت آن، نفوذ به درون سرامیک صورت می گیرد. این سرعت حدی بر اساس رابطه (۳) و اینکه $\dot{x} = 0$ برابرست با:

$$V_{lim} = \sqrt{\frac{2(Y_{co} - Y_p)}{\rho_p}} \quad (5)$$

با توجه به معادله (۳) اگر سرعت ناحیه تماس پرتابه - سرامیک (\dot{x}) در زمان انتهایی فاز اول یعنی (h_c/c) منفی باشد، نفوذ در سرامیک صورت نمی گیرد لذا سرعت و عمق نفوذ در انتهایی این فاز صفر در نظر می باشد، اگر \dot{x} مثبت باشد نفوذ پرتابه در سرامیک صورت گرفته و زمان انتهایی فاز اول تغییر می یابد زیرا لبه پرتابه قبل از رسیدن پیشانی ترک خوردگی به سطح آزاد سرامیک، به آن خواهد رسید. بنابراین شرط پایان یافتن مرحله اول با توجه به شکل ۱ بصورت زیر ارائه می شود:

$$x + S_{crack} = h_c \quad (6)$$

که در رابطه فوق S_{crack} ، فاصله طی شده توسط ترکهای شعاعی می باشد.

۲-۲- فاز دوم

در این مرحله پرتابه شروع به نفوذ در مخروط سرامیکی می نماید. پارامترهای هندسی مطابق شکل ۲ است. در این مرحله سه حالت در معادلات در نظر گرفته می شوند.

$$\dot{x}(t) < V(t) : \text{حالت اول} \quad 2-2-1$$

الف - معادلات حرکت پرتابه

زمانی که لبه پرتابه با پیشانی ترک خوردگی تلاقی می کند، نفوذ به درون حجمی از سرامیک آسیب دیده که استحکام فشاری آن کاهش یافته است آغاز می شود. پس از خرد شدن مخروط سرامیکی و از دست رفتن یکپارچگی و پیوستگی سرامیک، مقاومت آن به شدت کاهش می یابد. Zaera and Sanchez-Galvez [۴] رابطه ای را برای تعیین استحکام سرامیک بصورت زیر ارائه داد:

$$Y'_c = Y_{co} \left(\frac{\dot{x} - \dot{u}_0}{\dot{x}_{Phase 1}} \right)^2 \quad (7)$$

که در رابطه فوق Y_{co} مقاومت نفوذ سرامیک سالم، $\dot{x}_{Phase 1}$ سرعت ناحیه تماس پرتابه - سرامیک در انتهایی فاز اول و \dot{u}_0 سرعت لحظه ای مخروط سرامیکی می باشد.

با توجه به اینکه در شروع این فاز شرط $\dot{x}(t) < V(t)$ برقرار می باشد معادله Tate [۱۰] و Aleksevskii [۱۱] حاکم بر آن بصورت زیر است:

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (V - \dot{x})^2 = Y'_c + \frac{1}{2} \rho_c (\dot{x} - \dot{u}_0)^2 \quad (۸)$$

که اختلاف بین $V_{(t)}$ و $\dot{x}_{(t)}$ نرخ ساییدگی پرتابه و اختلاف بین $\dot{x}_{(t)}$ و $\dot{u}_{0(t)}$ نفوذ پرتابه را به مخروط سرامیک مطابق شکل (۲) می‌باشد. نرخ کاهش طول پرتابه نیز مجدداً از معادله (۲) محاسبه می‌گردد.

ب- معادلات حرکت سرامیک و خرد شدن آن

یکی از پارامترهای مؤثر در مدل کردن نفوذ به درون اهداف سرامیکی، زاویه مخروط سرامیکی تشکیل شده در اثر برخورد پرتابه می‌باشد در شکل (۳)، اثر سرعت اولیه برخورد در ابعاد ناحیه مخروطی نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت برخورد مقدار این زاویه کاهش می‌یابد [۴].

در این مقاله ابتدا رابطه ای خطی برای تعیین نیم زاویه اولیه ارائه می‌شود که در آن α_o با سرعت پرتابه نسبت عکس دارد. بر اساس این رابطه زاویه α_o مطابق با آزمایشات انجام شده توسط Wilson and Hetherington [۱۲] بین ۲۰ تا ۳۰ درجه متغیر است، بطوریکه در سرعت‌های زیر ۳۵۰ m/s زاویه α_o برابر با ۳۰ درجه، در سرعت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ m/s برابر با ۲۰ درجه و در سرعت‌های بین این دو مقدار بصورت خطی با افزایش سرعت از ۳۰ درجه تا ۲۰ درجه کاهش می‌یابد. ثانیاً فرض می‌کنیم که در طی فرسایش مخروط سرامیکی این زاویه نیز کاهش یافته و نهایتاً با فرسایش کامل سرامیک به ۱۵ درجه برسد بگونه ای که مطابق با شکل (۴) با تخریب سرامیک اضلاع مخروط تشکیل شده با هم موازی نبوده و با پیشروی نفوذ، انحراف این اضلاع کاهش می‌یابد. بنابراین زاویه تشکیل یافته اولیه مخروط در لحظه برخورد پرتابه به هدف را با یک رابطه خطی ریاضی بر اساس سرعت‌های اولیه پرتابه بصورت زیر تعیین می‌کنیم:

$$\begin{aligned} V_o \leq 350 & \rightarrow \alpha_o = 30 \times \pi / 180 \\ 350 \leq V_o \leq 1000 & \rightarrow \alpha_o = \left(\frac{1000 - V_o}{65} + 20 \right) \times \pi / 180 \\ V_o \geq 1000 & \rightarrow \alpha_o = 20 \times \pi / 180 \end{aligned} \quad (۹)$$

حال با فرض اینکه زاویه α در طی فرسایش سرامیک کاهش یابد و با فرسایش کامل به ۱۵ درجه برسد، می‌توان رابطه بین α با ضخامت لحظه ای سرامیک (h_{ct}) را بصورت زیر ارائه نمود:

$$\alpha_{(t)} = \left[\frac{h_{ct}}{h_c} \left(\alpha_o - 15 * \frac{\pi}{180} \right) + 15 * \frac{\pi}{180} \right] \quad (۱۰)$$

در نتیجه نرخ تغییرات زاویه α با زمان در طی فرآیند نفوذ با مشتقگیری از رابطه فوق حاصل می‌شود:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\alpha_o - 15 * \frac{\pi}{180}}{h_c} \frac{dh_{ct}}{dt} \quad (۱۱)$$

بر اساس پارامترهای هندسی نشان داده شده برای مخروط سرامیکی مطابق شکل (۵)، رابطه بین شعاع قاعده مخروط و ضخامت آن بصورت زیر است:

$$R_{ct} = \frac{D_p}{2} + h_{ct} \tan \alpha \quad (۱۲)$$

نرخ فرسایش ضخامت سرامیک نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{dh_{ct}}{dt} = -(\dot{x} - \dot{u}_0) , \quad h_{ct(t=t_1)} = h_c - x_1 \quad (13)$$

که در شرط اولیه رابطه فوق x_1 میزان نفوذ پرتابه در انتهای فاز اول می باشد. مخروط سرامیک در انتهای فاز اول و تا زمانی که توسط کامپوزیت پشتیبان ساکن شود، به حرکت خود ادامه می دهد. معادله حاکم بر حرکت مخروط، از معادله نیوتن و اینکه جرم مخروط سرامیکی وابسته به زمان است، از معادله زیر استخراج می گردد [۶]:

$$\frac{d(M_c \dot{u}_0)}{dt} \dot{u}_0 = -2F\dot{u}_0 \cos \theta - G\pi L^2 \dot{A} + Y'_c A_p \dot{u}_0 \quad (14)$$

که در این معادله، اولین و دومین ترم طرف راست به ترتیب بیانگر نیروی کامپوزیت بر روی سرامیک و انرژی از دست داده شده بر اثر تورق می باشد و سومین ترم نیروی پرتابه بر روی سرامیک می باشد. ترم $\pi L^2 G \dot{A}$ انرژی از دست رفته در واحد زمان را بعلت تورق (لایه لایه شدگی) صفحات کامپوزیت نشان می دهد و در ضربه های سرعت پایین پارامتر مهمی است اما در ضربه های سرعت بالا انرژی جذب شده به علت تورق بسیار کم است و بنابراین از این ترم در معادله صرف نظر می گردد [۶].

معادله کمکی برای تعیین نرخ کاهش جرم مخروط سرامیکی با توجه به شکل (۵) و محاسبه نرخ تغییر حجم و جرم مخروط سرامیکی عبارت است از:

$$\begin{aligned} \frac{dM_c}{dt} = \frac{\rho_c \cdot \pi}{3} \left[R_{ct}^2 + \frac{R_{ct}^2 D_p}{2R_{ct} - D_p} - \frac{D_p^3}{8R_{ct} - 4D_p} \right] \frac{dh_{ct}}{dt} \\ + \frac{\rho_c \cdot \pi}{3} \left[2R_{ct} h_{ct} + \frac{2R_{ct}^2 h_{ct} D_p - 2R_{ct} h_{ct} D_p^2}{(2R_{ct} - D_p)^2} + \frac{h_{ct} D_p^3}{2(2R_{ct} - D_p)^2} \right] \frac{dR_{ct}}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

ج- مدل سازی الیاف کامپوزیت و تغییر شکل آن

بطور کلی مکانیزم نفوذ در سرامیک - کامپوزیت به این صورت است که با کاهش جرم مخروط سرامیکی و حرکت آن به سمت کامپوزیت پشتیبان، ماده کامپوزیتی سه مرحله را به منظور شکست صفحات سپری می کند که به ترتیب رویداد آنها عبارتند از:

(۱) به هم فشردگی و تراکم صفحات ماده کامپوزیتی

(۲) کشش صفحات کامپوزیتی بصورت چهار سطحی با سطح مقطع لوزی شکل در ناحیه تشکیل مخروط سرامیکی

(۳) برش الیاف اصلی و در نتیجه آن شکست صفحات ماده کامپوزیتی

بواسطه نفوذ عمودی پرتابه و مخروط سرامیکی به کامپوزیت، تعداد الیافی که به مرور زمان در جهت x و y تحت کشش قرار می گیرند عبارتند از:

$$n = u_x \cdot \Delta t \cdot n_W \quad \text{یا} \quad n = u_y \cdot \Delta t \cdot n_F \quad (16)$$

که x و y مطابق شکل (۶)، مختصات قائم جلوی موج در زمان t ، n_F و n_W به ترتیب دانسیته یاف پود و تار در هر 10 cm می باشد، u_x و u_y به ترتیب سرعت انتشار موج عرضی در جهات x و y است. در صورت برابری قطر الیاف تار و پود $u_x = u_y = \sqrt{\frac{G_y}{2\rho_y}}$ که G_y مدول برشی الیاف می باشد [۶].

رابطه سرعت \dot{u}_0 لبه پرتابه و کرنش ε با توجه به مدل Smith و همکاران [۱۳] بصورت زیر می باشد:

$$\dot{u}_0 = c_y \sqrt{2\varepsilon \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon^2} \quad (17)$$

c_y سرعت موج طولی است که در الیاف بافته شده برابر $c_y = \sqrt{\frac{E}{2\rho_y}}$ می باشد که E مدول یانگ و ρ_y دانسیته لیف است. همچنین زاویه بین خط ضربه و لیف بصورت زیر می باشد [۸]:

$$\cos \theta = \frac{1}{1+\varepsilon} \frac{\dot{u}_0}{u} \quad (18)$$

که u سرعت موج عرضی جلویی نسبت به نقاط روی لیف کشیده شده است و مقدار آن با توجه به مدل Gu [۸] برابر $u = c_y \sqrt{\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}}$ می باشد. سرعت موج عرضی را با توجه به نتایج آزمایشگاهی برابر $u_{lab} = c_y (\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon)$ است [۸]. نیرویی که الیاف بر روی پرتابه اعمال می کنند نیز برابرست با:

$$F = \sigma_{(\varepsilon)} \cdot S \cdot n_1 \cdot n_y \quad (19)$$

که $\sigma_{(\varepsilon)}$ تابع تنش بر حسب کرنش، S سطح مقطع لیف، n_1 تعداد لایه ها و n_y تعداد الیاف قرار گرفته در زیر پرتابه که با نام الیاف اصلی شناخته می شوند می باشند. با توجه به اینکه با گذشت زمان نیم زاویه مخروط سرامیکی که در پیشانی پرتابه نفوذ کننده به کامپوزیت قرار دارد کاهش می یابد، بنابراین شعاع سطح مقطع مخروط سرامیکی در تماس با کامپوزیت و در نتیجه تعداد الیاف اصلی که در زیر مخروط سرامیکی قرار دارند نیز نسبت به زمان کاهش می یابد و بصورت رابطه زیر نشان داده می شود:

$$\frac{dn_y}{dt} = 4n_w \frac{dR_{ct}}{dt} \quad (20)$$

۲-۲-۲-۲-۲ حالت دوم: $h_{ct} = 0$

در هنگام حل معادلات فاز دوم، این احتمال وجود دارد که ضخامت لحظه ای مخروط سرامیک به صفر برسد، در اینصورت پرتابه مستقیماً در تماس با ماده کامپوزیتی قرار می گیرد و به پشتیبان کامپوزیتی نفوذ می کند. در این حالت معادله حرکت بصورت زیر است:

$$\left[M_{ct} \Big|_{res} + M_p \Big|_{res} \right] \frac{d\dot{u}_0}{dt} = -2F \cos \theta + Y_p A_p \quad (21)$$

$M_{ct} \Big|_{res}$ جرم مخروط سرامیک باقیمانده در پیشانی پرتابه است.

۲-۲-۳- حالت سوم: $\dot{x}_{(t)} = V_{(t)}$ (پرتابه صلب)

در هنگام حل معادلات پرتابه در فاز دوم ممکن است که سرعت ناحیه تماس پرتابه-سرامیک با سرعت پرتابه برابر شود. بنابراین در این حالت ($\dot{x}_{(t)} = V_{(t)}$)، سرعت نوک و انتهای پرتابه یکسان شده و فرسایش پرتابه متوقف می‌شود و لذا از این پس پرتابه بصورت یک جسم صلب به حرکت خود ادامه می‌دهد. این زمان، لحظه پایان فاز دوم و یا آغاز فاز سوم می‌باشد.

۲-۳- فاز سوم

در این فاز که سرعت ناحیه تماس پرتابه-سرامیک با سرعت پرتابه برابر است، نیروی پرتابه به سرامیک اعمال می‌شود و دو وضعیت ممکن است رخ دهد:

۲-۳-۱- وضعیت اول: سرعت مخروط از سرعت لبه پرتابه کوچکتر باشد ($\dot{u}_{0(t)} < V_{(t)}$).

در این وضعیت، پرتابه در مخروط سرامیکی نفوذ می‌کند تا اینکه شرط $h_{ct} = 0$ برقرار شود، یعنی مخروط سرامیک بطور کامل فرسایش یابد. در این حالت معادله حرکت بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{Y'_c}{\rho_p L_p|_{res}} \quad (22)$$

$L_p|_{res}$ طول باقیمانده پرتابه در انتهای فاز دوم و Y'_c استحکام دینامیکی سرامیک خرد شده می‌باشد. همچنین در این مرحله امکان از بین رفتن تعدادی از لایه‌های کامپوزیت در اثر نفوذ مخروط سرامیک به کامپوزیت وجود دارد که معادله بیان کننده این حالت برابر است با:

$$\frac{dn_1}{dt} = -\frac{(V - \dot{u}_0)}{d_{layer}} \quad (23)$$

که در رابطه فوق d_{layer} ضخامت هر لایه کامپوزیت بصورت نشان داده شده در شکل (۷) می‌باشد.

۲-۳-۲- وضعیت دوم: سرعت مخروط با سرعت پرتابه برابر شود ($\dot{u}_{0(t)} = V_{(t)}$).

هنگامی که سرعت مخروط با سرعت پرتابه برابر شود، دو جسم همانند یک پرتابه به کامپوزیت پشتیبان نفوذ خواهند کرد، انرژی جنبشی پرتابه و سرامیک با هم جمع شده و یک پرتابه همگن جدید با جرم و انرژی جنبشی کلی مجموعه پرتابه و مخروط سرامیک باقیمانده در ضربه به کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴- تأثیر نرخ کرنش در ماده کامپوزیت

با توجه به تاثیری که نرخ کرنش روی منحنی تنش کرنش الیاف کامپوزیت دارد و در این مقاله ماده کامپوزیتی مورد استفاده ماده توارون ($1000, 1680 \text{ dtex} / 1000 \text{ f}$) CT می‌باشد، براساس مدل [۸] Gu

اثر نرخ کرنش روی منحنی تنش کرنش ماده مطابق نمودار شکل (۸) بوده و رابطه تنش-کرنش را در نرخ کرنش (s^{-1}) ۱۰۰۰ برای الیاف توارون بصورت زیر در نظر گرفته می شود [۸]:

$$\begin{aligned} \sigma_{(\varepsilon)} &= (64 \times 10^9) \varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq 0.025 \\ \sigma_{(\varepsilon)} &= (40 \times 10^9) \varepsilon - (600 \times 10^6), & 0.025 < \varepsilon \leq 0.040 \\ \sigma_{(\varepsilon)} &= (32.35 \times 10^9) \varepsilon + (905.88 \times 10^6), & 0.040 < \varepsilon \leq 0.057 \\ \sigma_{(\varepsilon)} &= -(64.81 \times 10^9) \varepsilon + (6.444 \times 10^9), & 0.057 < \varepsilon \end{aligned} \quad (24)$$

۲-۵- معیار شکست کامپوزیت

معیار شکست مورد استفاده برای ماده کامپوزیت، معیار کرنش ماکزیمم می باشد. قسمتی از انرژی کرنشی جذب شده توسط الیاف صرف شکست الیاف اصلی و قسمت دیگر صرف تغییر شکل و شکست الیاف در ناحیه لوزی شکل (به استثنای الیاف اصلی) می شود. حاصل جمع میزان انرژی جذب شده توسط الیاف کامپوزیت و انرژی جذب شده توسط سرامیک مساوی کاهش انرژی جنبشی پرتابه است.

انرژی کرنشی الیاف مقید شده در زمانهای مختلف از روابط زیر محاسبه می شود [۸]:

$$\begin{aligned} W_{SY} &= 2c_y \Delta t n_y S \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_{(\varepsilon)} d\varepsilon = c_y \cdot \Delta t \cdot n_y \cdot S \cdot E \cdot (\varepsilon_{\max})^2, & 0 < \Delta t \leq \frac{r}{c_y} \\ W_{SY} &= 2rS n_y \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_{(\varepsilon)} d\varepsilon + 2u \Delta t n_y S \int_{\varepsilon_{\max}}^{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\text{reflect}}} \sigma_{(\varepsilon)} d\varepsilon = \\ & r \cdot S \cdot n_y \cdot E \cdot (\varepsilon_{\max})^2 + u \cdot \Delta t \cdot n_y \cdot S \cdot E \cdot (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\text{ins}})^2, & \frac{r}{c_y} < \Delta t \leq \frac{r}{u_{lab}} \\ W_{SY} &= 2rS n_y \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_{(\varepsilon)} d\varepsilon = r \cdot S \cdot n_y \cdot E \cdot (\varepsilon_{\max})^2, & \frac{r}{u_{lab}} < \Delta t \end{aligned} \quad (25)$$

که در رابطه فوق ε_{\max} کرنش شکست لیف و ε_{ins} کرنش ثابت در لیف به علت انتشار موج طولی می باشد. انرژی جنبشی الیاف اصلی نیز در زمانهای مختلف بصورت زیر است [۸]:

$$\begin{aligned} W_{KY} &= \left(\frac{u_{lab} \cdot \Delta t}{\sin \theta} \cdot Tex \right) \cdot \left(\frac{V_s + V_r}{2} \right)^2 \cdot n_y, & 0 < \Delta t \leq \frac{r}{u_{lab}} \\ W_{KY} &= \left(\frac{r \cdot \Delta t}{\sin \theta} \cdot Tex \right) \cdot \left(\frac{V_s + V_r}{2} \right)^2 \cdot n_y, & \frac{r}{u_{lab}} < \Delta t \end{aligned} \quad (26)$$

در رابطه فوق Tex دانسیته خطی لیف می باشد و مقدار آن با توجه به مدل Gu [۸] برابر با $(1Tex = 1 \text{ g}/1000 \text{ m})$ است، $\sin \theta = 1/(1 + \varepsilon)$ ، V_s و V_r به ترتیب بیانگر سرعت نفوذ پرتابه در هدف کامپوزیتی و سرعت باقیمانده پرتابه بعد از خروج از هدف کامپوزیتی می باشد. r بیانگر نیمی از طول لیف بین نقاط مقید شده است که از نظر مقداری برابر شعاع سطح مقطع مخروط سرامیکی (در سطح تماس سرامیک و کامپوزیت) می باشد که با توجه به نتایج آزمایشگاهی Parameswaran و همکاران [۷]، در

زمانی که پرتابه در مخروط سرامیکی نفوذ می‌کند نیم زاویه ترکهای مخروطی به تدریج افزایش می‌یابد بطوریکه بزرگترین نیم زاویه مخروطی 65° است، بنابراین مقدار r برابر است با:

$$r = \frac{D_p}{2} + h_c \tan 65^\circ \quad (27)$$

انرژی کرنشی i امین لیف در ناحیه تغییر شکل یافته لوزی شکل به غیر از الیاف اصلی در شکل (۶) عبارت است از [۸]:

$$W_i = \frac{1}{2} \cdot S \cdot u \cdot \Delta t \cdot E \cdot \left(1 - \frac{i}{n}\right)^3 \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_{ins})^2, \quad 0 < \Delta t \leq \frac{r}{u_{lab}}$$

$$W_i = \frac{1}{2} \cdot S \cdot r_i \cdot \Delta t \cdot E \cdot \left(1 - \frac{i}{n}\right)^2 \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_{ins})^2, \quad \frac{r}{u_{lab}} < \Delta t \quad (28)$$

که در رابطه فوق ε_0 کرنش الیاف اصلی قرار گرفته در زیر پرتابه و می‌باشد. طول i امین لیف در ناحیه موج عرضی عبارت است از:

$$(\Delta l)_i = \left(1 - \frac{i}{n}\right) \cdot \Delta l, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

که در اینجا Δl بیانگر طول الیاف اصلی در ناحیه موج عرضی می‌باشد.

مجموع انرژی جنبشی الیاف در ناحیه تغییرشکل یافته لوزی شکل باستثنای الیاف اصلی (از شماره ۱ تا n) عبارت است از:

$$W_{K1} = 4 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta l_i}{\sin \theta} \cdot Tex \right) \cdot \left(\frac{V_s + V_r}{2} \right)^2 = 4 \cdot \frac{u_{lab} \cdot \Delta t}{\sin \theta} \cdot Tex \cdot \left(\frac{V_s + V_r}{2} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i}{n}\right) \quad (30)$$

بنابراین با توجه به موارد ارائه شده در بالا مجموع انرژی کرنشی و جنبشی الیاف برای تک لایه و در ناحیه تغییر شکل داده شده در ماده کامپوزیتی از معادلات (۲۵، ۲۶، ۲۸ و ۳۰) بدست می‌آید. برای بسط آن برای ماده کامپوزیتی چند لایه با صرفنظر از اصطکاک بین لایه‌ها، انرژی جنبشی و انرژی کرنشی تک لایه در تعداد لایه‌های ماده کامپوزیتی ضرب می‌گردد. بنابراین انرژی جذب شده برای ماده کامپوزیتی چند لایه عبارت است از:

$$W = n_1 \cdot W_{SY} + 4 \cdot n_1 \cdot \sum_{i=1}^n W_i + n_1 \cdot W_{KY} + n_1 \cdot W_{K1} \quad (31)$$

بر اساس قانون بقای انرژی حاصل جمع دو نوع انرژی جذب شده توسط ماده کامپوزیتی و انرژی جنبشی جذب شده توسط سرامیک برابر کاهش انرژی جنبشی پرتابه می‌باشد.

معادلات حاکم بر مدل تحلیلی در هر مرحله شامل یک سری معادلات دیفرانسیل مرتبه اول و یک سری معادلات جبری می‌باشند. برای حل این معادلات برنامه کامپیوتری با زبان Matlab تهیه گردیده که معادلات دیفرانسیل حاکم را به روش عددی رانچ گاتا مرتبه چهار حل نموده و با گرفتن پارامترهای ورودی اولیه شامل مشخصات هندسی و مکانیکی پرتابه، سرامیک و کامپوزیت پارامترهای مجهول را در هر لحظه زمانی محاسبه می‌نماید. مجهولات شامل، مدت زمان فرآیند نفوذ، سرعت باقیمانده پرتابه، طول باقیمانده

پرتابه، میزان نفوذ پرتابه در هدف، جرم سرامیک باقیمانده در پیشانی پرتابه و میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت پشتیبان می باشد.

۳- نتایج و بحث

در ادامه به منظور بررسی دقت نتایج مدل تحلیلی جدید، نتایج حاصل از آن با نتایج مدل تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶] مقایسه گردیده و بحث و بررسی لازم صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در هیچ یک از مراجع نتایج آزمایشگاهی برای چنین سیستم پرتابه هدفی ارائه نشده است. دو نوع پرتابه به منظور مقایسه در نظر گرفته می شود که در مقایسه اول پرتابه تنگستنی کالیبر APDS ۲۵ با تنش تسلیم دینامیکی ۳/۲ GPa، به طول ۳۰mm، قطر ۱۰mm و جرم ۴۱/۷ gr و در مقایسه دوم پرتابه تنگستنی کالیبر APDS ۳۰ به طول ۴۱mm، قطر ۱۴mm و جرم ۱۱۴/۳ gr می باشد. هدف نیز از دو لایه شامل رویه سرامیکی از جنس آلومینای ۹۹/۵٪ با چگالی جرمی 3840 kg/m^3 و استحکام دینامیکی ۷/۵ GPa [۶] پشتیبانی شده با ماده کامپوزیتی از جنس الیاف توارون (CT۱۰۰۰، ۱۶۸۰ dtex/۱۰۰۰ f) با ضخامت هر لایه ماده کامپوزیتی ۰/۴mm می باشد. مشخصات مکانیکی الیاف توارون در نرخ کرنش (s^{-1}) ۱۰۰۰ عبارتند از مدول یانگ ۷۲ GPa، نسبت پواسون ۰/۳۱، تنش تسلیم ۲/۷۵۳ GPa، کرنش شکست ۰/۰۵۷، دانسیته خطی هر کدام از الیاف تار و پود ۳۳۶۰، سطح مقطع لیف $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ، دانسیته حجمی لیف 1440 kg/m^3 ، تراکم الیاف در هر ۱۰cm برای الیاف تار ۶۷ عدد و برای الیاف پود ۶۶ عدد می باشد [۸]. تغییرات مدول یانگ و تنش تسلیم و کرنش شکست در نرخ کرنشهای مختلف مطابق جدول (۱) است.

با توجه به وضعیت پرتابه و هدف، جدول (۲) سرعتهای باقیمانده پرتابه APDS ۲۵ و جدول (۳) سرعتهای باقیمانده پرتابه APDS ۳۰ را در وضعیتهای مختلف برخورد نشان می دهد. به منظور ارزیابی بهتر دقت نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی جدید، در شکل (۹) تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه در هر حالت آزمایش با نتایج تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶] مقایسه شده است.

با توجه به جدول (۱) و (۲) و شکل (۹) مشاهده می گردد که مقادیر سرعت باقیمانده محاسبه شده مدل تحلیلی جدید همخوانی مناسبی با نتایج مدل تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶] دارد. فقط در وضعیتهای ۴ و ۱۰ میان مدل تحلیلی جدید و مدلسازی عددی چاکرون-گالوز اختلاف زیادی وجود دارد، همچنین مشاهده می گردد که نتایج مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله همخوانی بهتری با نتایج شبیه سازی عددی انجام شده توسط Chocron-Galvez [۶] نسبت به مدل تحلیلی آنها دارد. علت این موضوع اصلاحات و بهینه سازیهای مدل جدید است که باعث شده از معادلات جدیدتر ارائه شده توسط Gu [۸] برای شبیه سازی رفتار ماده کامپوزیت استفاده شود و روش ارائه شده قبلی را اصلاح نماید.

با افزایش ضخامت ماده کامپوزیت پشتیبان، کرنش ایجاد شده در کامپوزیت پشتیبان کاهش یافته و پرتابه دچار کاهش سرعت بیشتری در طی فرآیند نفوذ می شود و برعکس با کاهش ضخامت کامپوزیت پشتیبان، کرنش ایجاد شده در کامپوزیت پشتیبان افزایش یافته و پرتابه کاهش سرعت کمتری در طی فرآیند خواهد داشت. لذا افزایش ضخامت ماده کامپوزیت باعث کاهش سرعت باقیمانده پرتابه می شود.

منحنی سرعت باقیمانده بر حسب سرعت اولیه برخورد برای ارزیابی بهتر مدل تحلیلی جدید ارائه شده در مقایسه با مدل تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶] برای پرتابه ۱۱۴/۳gr در شکل (۱۰) در محدوده سرعت‌های برخورد بین $1000 (m/s)$ تا $2000 (m/s)$ آورده شده است.

شکل (۱۱) نحوه تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان را برای شرایط پرتابه با جرم $114/3 \text{ gr}$ در سرعت برخورد 1250 m/s و هدف با سرامیک با ضخامت 20 mm بعنوان ماده رویی و کامپوزیت با ضخامت 20 mm به عنوان ماده پشتی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد که نحوه تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان در مدل تحلیلی Chocron-Galvez [۶] تنها در فاز اول $0 \mu s < t < 11 \mu s$ با مدلسازی عددی انجام شده آنها (توسط نرم افزار Autodyn 2-D) انطباق دارد و بعد از این فاز که پرتابه و مخروط سرامیک باعث حرکت کامپوزیت می‌شود انطباق خوبی در نتایج وجود ندارد. زیرا در مدل تحلیلی Chocron-Galvez [۶] به منظور ساده‌سازی تحلیل هیچ فرآیند فرسایشی برای کامپوزیت تعریف نشده است. حال آنکه در مدلسازی عددی فرآیند فرسایش در نظر گرفته می‌شود، بنابراین اختلاف زیادی بین میزان تغییرات سرعت پرتابه در زمان‌های مختلف نفوذ و زمان شکست کامپوزیت بین مدل تحلیلی Chocron-Galvez [۶] و مدلسازی عددی آنها وجود دارد. در مدل تحلیلی جدید به علت اینکه فرآیند فرسایش برای هر لایه ماده کامپوزیت در طی فرآیند نفوذ در نظر گرفته شده است و همچنین پارامتر نرخ کرنش الیاف در نظر گرفته می‌شود، میزان تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان در طی فرآیند انطباق خوبی وجود دارد.

شکل (۱۲) تغییر طول باقیمانده پرتابه بعد از نفوذ در هدف را در مدل جدید با تغییر سرعت برخورد و ضخامت هدف برای پرتابه 41.7 gr و 114.3 gr با مدل تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶] برای ۱۱ مورد ارائه شده در جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که پیش بینی مدل تحلیلی جدید در محاسبه طول باقیمانده پرتابه بعد از نفوذ در هدف همخوانی مناسبی با مدل تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶] ندارد.

میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت پشتیبان در محدوده سرعت برخورد پرتابه بین 1000 m/s تا 2000 m/s در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که از منحنی شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد با افزایش سرعت برخورد پرتابه به هدف، از سرعت 1000 m/s تا 1310 m/s انرژی جذب شده توسط کامپوزیت پشتیبان افزایش می‌یابد تا اینکه در سرعت 1310 m/s به بیشترین مقدار می‌رسد. علت افزایش میزان انرژی این است که با افزایش سرعت برخورد، مخروط سرامیکی که در پیشانی پرتابه قرار می‌گیرد مدت زمان بیشتری لازم دارد تا به سرعت پرتابه برسد و این مدت زمان بیشتر باعث می‌شود که انرژی بیشتری جذب ماده کامپوزیت شود. در سرعت‌های بیشتر از 1310 m/s مخروط سرامیکی دچار کاهش حجم می‌شود و سبب می‌شود که در زمان کوتاه‌تری به سرعت پرتابه برسد و بنابراین انرژی جذب شده توسط کامپوزیت نیز کاهش می‌یابد، تا اینکه در سرعت برخورد 1360 m/s کل مخروط سرامیکی قرار گرفته در پیشانی پرتابه از بین رفته و شکست زود هنگام کامپوزیت پشتیبان را باعث می‌گردد. بنابراین انرژی جذب شده توسط ماده کامپوزیت دچار کاهش می‌شود و بعد از سرعت 1360 m/s مجدداً روند صعودی انرژی جذب شده توسط کامپوزیت پشتیبان ادامه می‌یابد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به بررسی نتایج مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله نتیجه گیریهای زیر حاصل می گردد:

- مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله یک مدل کاربردی، سریع با دقت مناسب برای پیش بینی مقاومت به نفوذ اهداف دو لایه سرامیک-کامپوزیت در برخورد پرتابه های کالیبر کوچک و متوسط می باشد.
- با توجه به مقایسه نتایج مدل تحلیلی جدید با مدل تحلیلی و عددی Chocron-Galvez [۶]، ملاحظه گردیده که مدل تحلیلی جدید سرعت و طول باقیمانده پرتابه و نحوه تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان را در مقایسه با مدل تحلیلی Chocron-Galvez [۶] با دقت مناسب تری پیش بینی می باشد و نتایج آن انطباق مناسبی تری با مدلسازی عددی Chocron-Galvez [۶] دارد.
- اصلاح زاویه مخروطی سرامیکی در حین شکل گیری، در نظر گرفتن نرخ کرنش در رابطه تنش کرنش معادلات کامپوزیت و ارائه روشی جدید برای تعیین شکست الیاف در حین نفوذ که در مدل های قبلی از آن صرف نظر شده است، باعث بهبود مدل تحلیلی شده است.

مراجع

- [1] Florence, A. L., "Interaction of Projectiles and Composite Armor", Internal Report, US Army, August , (1969).
- [2] Den Reijer, P.C., "Impact on Ceramic Faced Armours", PhD thesis, Delft University of Technology, (1991).
- [3] Hetherington, J. G., "The Optimization of Two-component Composite Armors", Int. J. Impact Engng ,Vol. 12, pp. 229-59, (1992).
- [4] Zaera, R., Sanchez-Galvez, V., "Analytical Model of Ballistic Impact on Ceramic/Metal Lightweight Armours", Int. J. Impact Engng. Vol. 21, pp. 133-48, (1998).
- [۵] فعلی، سعید، اعلمی آل آقا، محمد ابراهیم ، احمدی، زین العابدین، "تحلیل نفوذ عمودی پرتابه های تغییر شکل پذیر در اهداف سبک وزن سرامیک- فلز"، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، سال نهم، شماره دوم، ۱۳۸۶.
- [6] Chocron Benloulo, I.S., and Sanchez Galvez, V., "A Nnew Analytical Model to Simulate Impact onto Ceramic/composite Armors", Int. J. Impact Engng. Vol. 21 No. 6, pp. 461-71, (1998).
- [7] Parameswaran, V., Bentley, W., Shukla, A., and Prosser, R. A., "A New Approach for Improving Ballistic Performance of Composite Armor", Experimental Mechanics, Vol. 39, No.2, (1999).
- [8] Gu, B., "Analytical Modeling for the Ballistic Perforation of Planar Plain Woven Fabric Target by Projectile", Composites (Part B), Vol. 34, No. 4, pp. 361-71, (2003).

- [9] Shokrieh, M.M., and Javadpour, G.H., "Penetration Analysis of a Projectile in Ceramic Composite Armor", *Composite Struct.*; Vol. 82, No. 2, pp. 269-76, (2008).
- [10] Tate, A., "A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 15, pp. 387-399, (1967).
- [11] Alekseevskii, V. P., "Penetration of a Rod into a Target at High Velocity", in *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 2, Faraday Press, New York, USA, (1966).
- [12] Wilson, D., and Hetherington, J. G., "Analysis of Ballistic Impact on Ceramic Faced Armour using High Speed Photography", *Proc. Lightweight Armour System Symp.* Royal Military College of Science, Cranfield, (1995).
- [13] Smith, J. C., McCrackin, F. L., and Schiefer, H. F., "Stress-strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading. Part V: Wave Propagation in Long Textile Yarns Impacted Transversely", *Textile Res. J.*, pp. 288-302, (1958).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A : درصد حجم تورق
- A_p : سطح مقطع پرتابه
- C : سرعت موج تنش طولی در سرامیک
- c_y : سرعت موج طولی در الیاف
- D_p : قطر پرتابه
- d_{layer} : ضخامت هر لایه کامپوزیت
- E : مدول یانگ الیاف
- F : نیروی هر لیف بر روی مخروط سرامیک
- G : انرژی لازم جهت تورق 1 m^2 کامپوزیت
- G_y : مدول برشی الیاف
- h_c : ضخامت اولیه رویه سرامیکی
- h_{ct} : ضخامت لحظه ای مخروط سرامیکی
- L : طول مشخصه صفحه کامپوزیت پشتیبان
- $L_{p(t)}$: طول لحظه ای پرتابه
- $L_p|_{res}$: طول باقیمانده پرتابه در لحظه صلب شدن
- M_p : جرم پرتابه
- M_c : جرم مخروط سرامیک
- n_1 : تعداد لایه های کامپوزیت
- n_y : تعداد الیاف زیر پرتابه

- n_w, n_F : به ترتیب دانسیته الیاف تار و پود در 10 cm
- R_{ct} : شعاع لحظه ای قاعده مخروط سرامیکی
- r : نیمی از طول لیف قرار گرفته بین دو نقطه مقید شده
- S : سطح مقطع لیف
- S_{crack} : فاصله پیموده شده توسط ترکهای شعاعی
- Tex : دانسیته خطی لیف
- U : سرعت پیشانی موج عرضی نسبت به نقاط روی لیف غیر کشیده شده
- $\dot{u}_{0(t)}$: سرعت مخروط سرامیک
- V : سرعت پرتابه در زمانهای مختلف
- V_r : سرعت باقیمانده
- V_s : سرعت ضربه
- V_{lim} : سرعت حدی پرتابه برای نفوذ
- W_{KY} : انرژی جنبشی لیف
- W_{SY} : انرژی کرنشی لیف
- $\dot{x}_{(t)}$: سرعت نفوذ در سطح تماس پرتابه- سرامیک
- \dot{x}_{Phase1} : سرعت تماس پرتابه- سرامیک در انتهای فاز اول
- Y'_c : استحکام دینامیکی سرامیک خرد شده
- Y_{co} : استحکام دینامیکی سرامیک سالم
- Y_p : تنش تسلیم دینامیکی پرتابه

نمادهای یونانی

- α_o : نیم زاویه اولیه مخروط سرامیکی
- $\alpha_{(t)}$: نیم زاویه لحظه ای مخروط سرامیکی
- Δt : مرحله زمانی نفوذ
- Δl : طول الیاف اصلی در ناحیه موج عرضی
- \mathcal{E} : کرنش در لیف
- \mathcal{E}_0 : کرنش الیاف اصلی
- $\dot{\mathcal{E}}$: نرخ کرنش
- \mathcal{E}_{ins} : کرنش ثابت در لیف به علت موج طولی
- \mathcal{E}_{max} : کرنش شکست لیف
- ν : نسبت پواسون
- ρ_c : چگالی سرامیک
- ρ_p : چگالی پرتابه

ρ_y : چگالی لیف

θ : زاویه بین لیف و جهت ضربه

σ : تنش در لیف

جدولها

جدول ۱- خواص مکانیکی الیاف توارون تحت تأثیر نرخ کرنشهای مختلف [۸]

Strain rate (s^{-1})	E (Gpa)	σ_{max} (Gpa)	ϵ_{max} (%)
۰/۱۰	۶۲	۲/۳	۵/۱۹
۱۸۰	۶۹	۲/۵	۵/۲۲
۴۸۰	۷۰	۲/۷	۵/۴۷
۱۰۰۰	۷۲	۲/۷	۵/۷

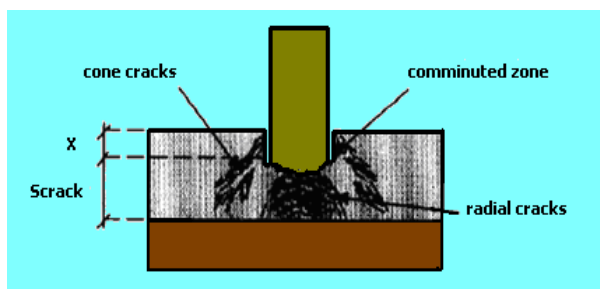
جدول ۲- مقایسه سرعتهای باقیمانده پرتابه بر حسب سرعتهای برخورد مختلف به هدف برای پرتابه ۴۱/۷gr

وضعیت	$V_s(m/s)$	ضخامت سرامیک (mm)	ضخامت کامپوزیت (mm)	$V_r(m/s)$ مدل تحلیلی چاکرون- چاکرون [۶] گالوز	$V_r(m/s)$ مدل عددی چاکرون-گالوز [۶]	$V_r(m/s)$ مدل تحلیلی جدید
۱	۱۱۰۰	۲۰	۲۰	۲۸۰	۶۵۰	۶۱۵
۲	۱۲۵۰	۲۰	۲۰	۷۲۰	۷۸۰	۷۴۳
۳	۱۴۰۰	۲۰	۲۰	۹۹۰	۹۸۰	۹۸۴
۴	۱۲۵۰	۲۵	۲۰	۳۰۰	۴۳۰	۷۰۰
۵	۱۲۵۰	۱۵	۱۵	۹۴۰	۸۷۰	۸۷۱

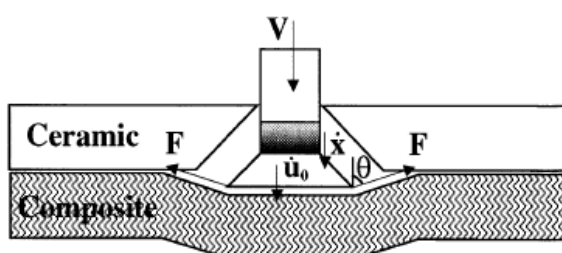
جدول ۳- مقایسه سرعتهای باقیمانده پرتابه بر حسب سرعتهای برخورد مختلف به هدف برای پرتابه ۱۱۴/۳gr

وضعیت	$V_s(m/s)$	ضخامت سرامیک (mm)	ضخامت کامپوزیت (mm)	$V_r(m/s)$ مدل تحلیلی چاکرون-گالوز [۶]	$V_r(m/s)$ مدل عددی چاکرون-گالوز [۶]	$V_r(m/s)$ مدل تحلیلی جدید
۶	۱۰۰۰	۲۰	۲۰	۵۲۰	۶۶۰	۵۶۳
۷	۱۲۵۰	۲۰	۲۰	۹۵۰	۹۴۰	۹۱۹
۸	۱۵۰۰	۲۰	۲۰	۱۲۸۰	۱۲۲۰	۱۲۹۸
۹	۱۲۵۰	۲۰	۲۵	۹۳۰	۹۱۰	۹۰۶
۱۰	۱۲۵۰	۲۵	۲۰	۸۵۰	۸۹۰	۸۰۰
۱۱	۱۲۵۰	۲۵	۲۵	۸۲۰	۸۳۰	۷۶۵

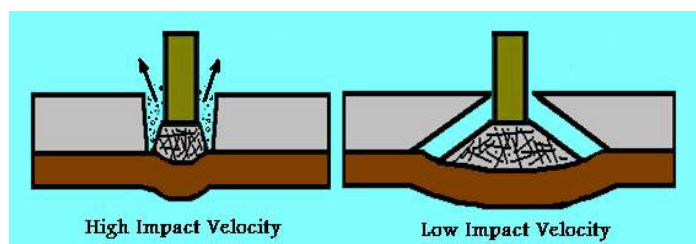
شکلها



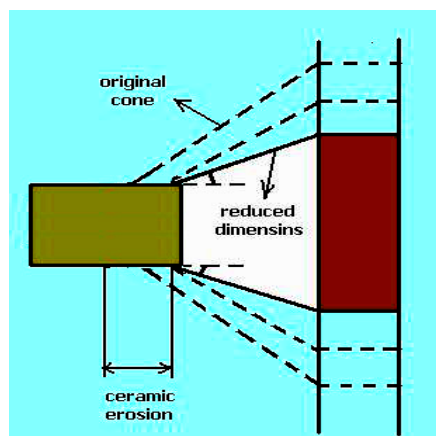
شکل ۱- برخورد لبه پرتابه و پیشانی ترک خوردگی سرامیک، انتهای مرحله اول نفوذ [۴]



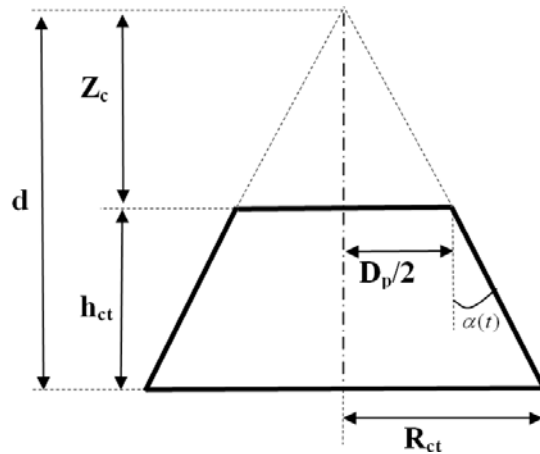
شکل ۲- پارامترهای هندسی در فاز دوم نفوذ [۴]



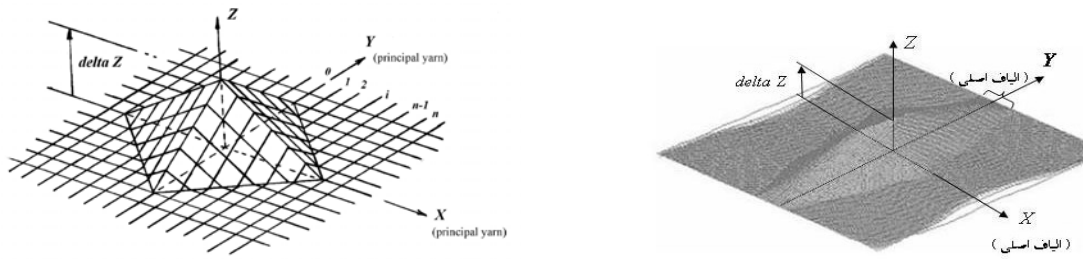
شکل ۳- تغییر شکل هدف در طی فاز دوم بسته به سرعت ضربه [۴]



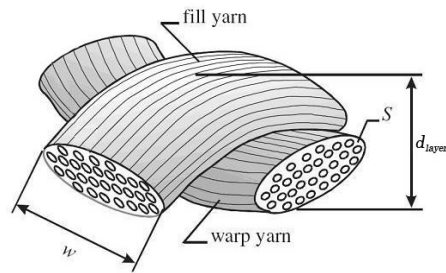
شکل ۴- تخریب سرامیک و کاهش نیم زاویه مخروطی در طی نفوذ [۱۲]



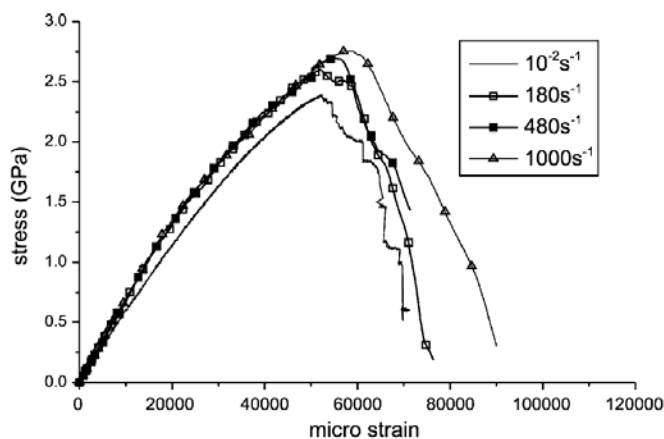
شکل ۵ - شبیه سازی هندسی مخروط سرامیک



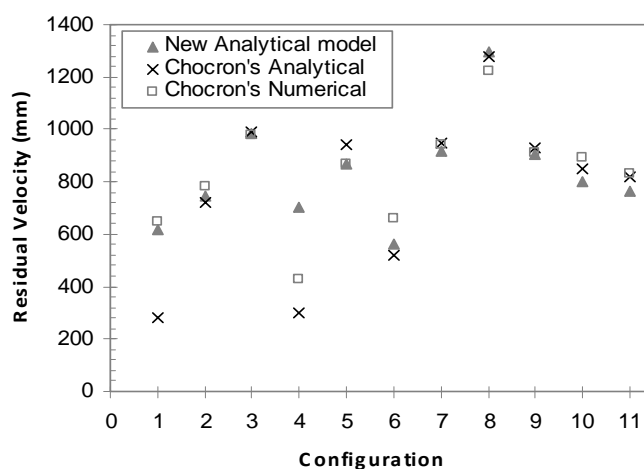
شکل ۶- تصویر سه بعدی ناحیه لوزی شکل دو بعدی الیاف تحت ضربه پرتابه و نمایش الیاف اصلی و غیر اصلی [۵]



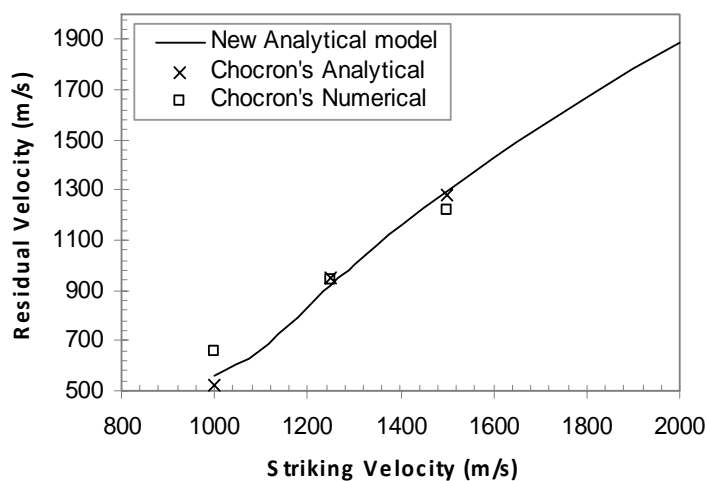
شکل ۷- نمای شماتیک چیدمان الیاف تار و پود در یک سلول از پارچه کامپوزیتی به ضخامت d_{layer}



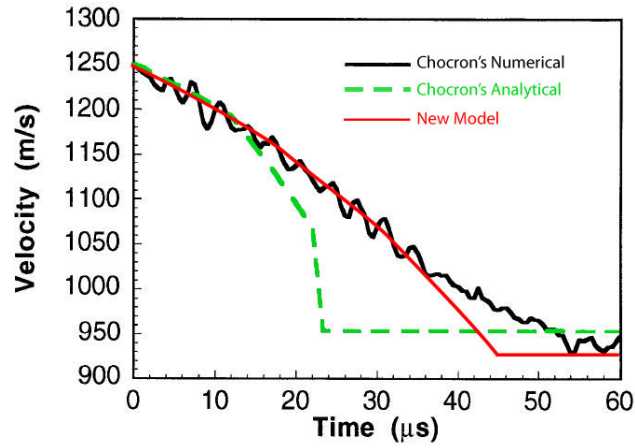
شکل ۸- منحنیهای تنش-کرنش الیاف توaron در نرخ کرنشهای مختلف [۸]



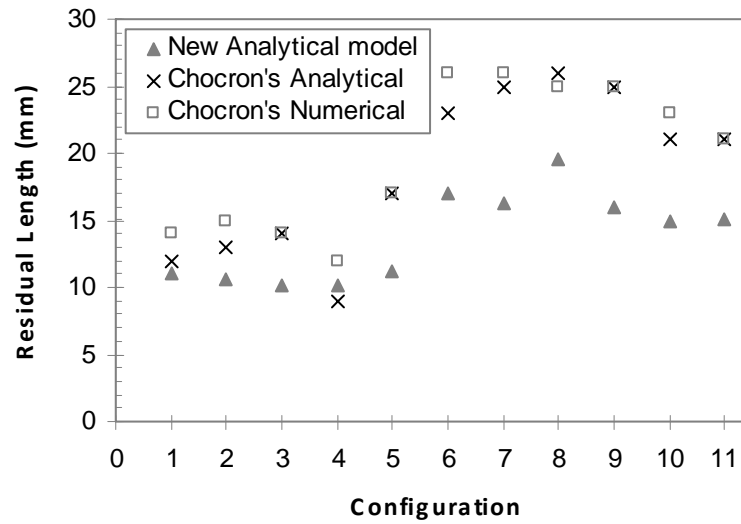
شکل ۹- مقایسه سرعتهای باقیمانده در مدل تحلیلی جدید با مدل تحلیلی چاکرون-گالوز برای ۱۱ وضعیت مختلف پرتابه و هدف ارائه شده در جدول ۲ و ۳



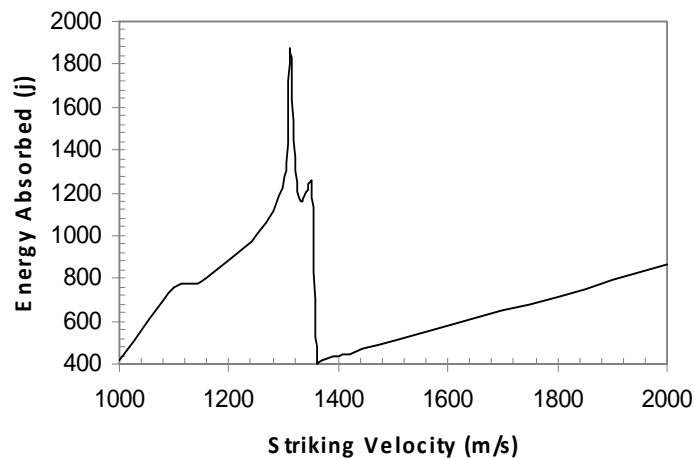
شکل ۱۰- نمودار سرعت باقیمانده بر حسب سرعت برخورد برای پرتابه نوع دوم و هدف سرامیک-کامپوزیت ضخامت هدف ۲۰ mm - ۲۰ mm



شکل ۱۱- تغییرات سرعت پرتابه در زمانهای مختلف فرآیند نفوذ وضعیت پرتابه نوع دوم.



شکل ۱۲- مقایسه طولهای باقیمانده پرتابه در ۱۱ وضعیت جدول ۲ و ۳



شکل ۱۳- منحنی انرژی جذب شده توسط ماده کامپوزیتی پشتیبان در اثر اصابت پرتابه در حالت اول

Abstract

In this paper, a new analytical model has been presented for perforation of cylindrical projectiles into two-layer ceramic - composite plates. Analytical modeling of Chocron and Galvez is used for modeling erosion and failure of ceramic and determining the semi angle of ceramic conoid and a relation for considering its changes within the penetration process have been introduced. For describing composite back up plate, one-dimensional stress wave propagation in fibers has been used and strain rate effects is considered in stress-strain equation of fibers. Based on energy conservation law, the absorbed kinetic energy of projectile equals to kinetic and strain energy of composite fibers. The results of new analytical model are in consistency with numerical and analytical results of Chocron and Galvez model.