

بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه در یک هدف سرامیک/کامپوزیت

محمد مشتاقیان^۱ و خداداد واحدی^۲

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۱۲)

چکیده

در این مقاله، ابتدا یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا به اهداف سرامیک/کامپوزیت ارائه شده که پس از تأمین داده‌های ورودی می‌توان سرعت باقی‌مانده، جرم باقی‌مانده، سرعت لحظه‌ای پرتابه و عمق نفوذ در هر لحظه را به‌عنوان خروجی از مدل استخراج نمود. این مدل بر اساس معادلات انرژی و مومنتوم تیت، آلکسیوسکی و کوکرون بیان شده است. در این مدل، پدیده نفوذ طی دو فاز بررسی می‌شود. در فاز اول، مخروط سرامیکی در حال شکل‌گیری بوده و هیچ‌گونه نفوذی در الیاف وجود ندارد. در فاز دوم، مخروط سرامیکی شکسته شده به همراه پرتابه به الیاف نفوذ می‌کند. در این فاز، معادلات حرکت پرتابه برای نفوذ در سرامیک و سپس الیاف کامپوزیتی استخراج و برای حصول نتایج حل شده است. این مدل برای پرتابه تنگستنی و هدف آلومینا به‌عنوان سرامیک و دینما یا کولار به‌عنوان کامپوزیت استفاده و نتایج ارائه شده تطابق بسیار خوبی با نتایج حل عددی و همچنین مدل تحلیلی کوکرون و گالوز دارد.

واژه‌های کلیدی: برخورد بالستیک سرعت بالا، نفوذ، اهداف سرامیک کامپوزیت، مدل تحلیلی

Penetration Analysis of a Projectile into a Ceramic/Composite Armor

M. Moshtaghian and Kh. Vahedi

Mech. Eng. Dep't.

Imam Hussein Univ.

(Received: 24 May 2010, Accepted: 2 Jan. 2011)

ABSTRACT

In this article, a simple analytical model for a high velocity projectile penetrating into a ceramic-faced composite armor is presented. The output of the model is residual velocity, residual mass, projectile instantaneous velocity, and projectile instantaneous penetration depth. The model is based on momentum and energy balance developed by Tate, Alekseevski, and Chocron. In this model, penetration process is investigated in two phases. The first phase is when ceramic conoid is formed and there is no penetration into yarns and the second phase is when ceramic-conoid penetrates into backing composite material along with the projectile. The governing equations are developed and the results are analyzed. The model is tested for a tungsten rod and an alumina-faced dyneema and a kevlar. The results are in good agreement with numerical simulation and analytical results of Chocron & Galvez.

Keywords: High Velocity Impact Ballistics, Penetration, Ceramic/Composite Armor, Analytical Model

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: Mohammadmoshtaghian@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): Vahedi1710@yahoo.com

۱- مقدمه

رویگرد دوم که در واقع پروسه نفوذ را با کمک هیدروکدها و روش‌های المان محدود، به صورت عددی شبیه‌سازی می‌کند نیز معایبی دارد. از جمله این معایب این‌که هر دو روش المان محدود و تفاضل محدود به پارامترهای زیادی برای توصیف ماده نیاز دارند که اغلب این پارامترها مجهول بوده و به دست آوردن آنها مشکل است. برای نمونه طبق گفته محققین، به منظور بررسی برخورد پرتابه تنگستنی به یک زره سرامیک/کامپوزیتی، به ۵۰ پارامتر مختلف مکانیکی، شامل ثوابت الاستیک ماده (در هر جهت)، تنش تسلیم دینامیکی و ... نیاز است. رویگرد سوم که یک بررسی تئوری و تحلیلی بر روی پدیده نفوذ دارد یک روش ساده و راهی سریع برای دست‌یابی به نتایج مورد نظر می‌باشد که با استفاده از معادلات انرژی، بقای مومنوم، قانون دوم نیوتن، معادله برنولی و ... به توصیف رخدادهای فیزیکی در حین پروسه نفوذ می‌پردازد. در صورت تطابق نتایج مدل تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان بر اعتبار مدل تحلیلی، صحت گذاشت. برای بررسی پدیده نفوذ به صورت تحلیلی کارهای زیادی توسط محققین انجام گرفته که از آن جمله می‌توان به مدل تیت^۱، فلوز^۲، فلورنس^۳، خدارحمی، لیاقت، کوکرون^۴ و ... اشاره کرد [۱-۴]. در صورت دست‌یابی به برنامه‌های رایانه‌ای این مدل‌ها، می‌توان در کمتر از چند دقیقه به نتایج مورد نظر دست یافت. بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه‌ها در اهداف مرکب سرامیک/کامپوزیت نیز توسط محققین انجام گرفته است که می‌توان به مدل تحلیلی کوکرون بن‌لولو که تحلیلی یک‌بعدی از نفوذ پرتابه به هدف سرامیک/کامپوزیت دارد اشاره نمود [۴]. شبیه‌سازی و حل عددی نفوذ پرتابه در هدف سرامیک/کامپوزیت نیز توسط محققین انجام گرفته است [۵]. همچنین موارد زیادی از ارائه مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه در اهداف کامپوزیتی بدون لایه سرامیکی در جلو را در مراجع می‌توان یافت [۶-۹].

در این مقاله، به بررسی و تحلیل پدیده نفوذ یک پرتابه در یک زره سرامیک/کامپوزیت پرداخته شده است. مدل مورد بحث، بر اساس مدل کوکرون بن‌لولو و سانچز گالوز

مقاومت در برابر برخوردهای سرعت بالا، یکی از پارامترهای مهم در طراحی زره است. طبق تحقیقات و یافته‌های محققین در زمینه طراحی زره، یک زره موقعی می‌تواند کارایی بالایی داشته باشد که خصوصیات همچون چگالی پایین، مقاومت به شکست در برابر تنش‌های کششی بزرگ و مدول حجمی و برشی بالا به منظور سختی بالا را دارا باشد. زره‌های تک لایه فلزی به دلیل بالا بودن چگالی مواد فلزی تمامی خواص نامبرده را ارضاء نمی‌کند. مواد سرامیکی هم غیر از مورد مقاومت در برابر تنش کششی بزرگ، بقیه موارد را ارضاء می‌کنند. از این رو محققین درصد برآمدند که زره‌های ترکیبی، به صورت لایه‌ای از سرامیک در جلو و لایه‌ای از فلز و یا کامپوزیت به عنوان لایه پشتیبان طراحی کنند که در حالت بهینه، تمامی خصوصیات یک زره کارآمد را دارا باشد.

زره‌های سرامیکی که با مواد کامپوزیتی به عنوان ماده پشتیبان به کار می‌روند، به خاطر کارایی بالای آنها در برابر پرتابه‌های کالیبر کوچک و متوسط، در طی سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه مواد کامپوزیتی دارای سختی نسبتاً بالا و نسبت مقاومت به وزن و همچنین قابلیت جذب انرژی بالایی هستند، صرف نظر از هزینه، در مقایسه با مواد فلزی همچون فولاد و آلومینیم کارایی بالاتری برای استفاده در پشتیبان زره دارند. در میان مواد کامپوزیتی، الیاف کولار، اسپکترا و گرافیت/اپوکسی به دلیل خصوصیات مکانیکی مناسب، بیشترین کاربرد را در استفاده از پشتیبان زره‌ها دارند.

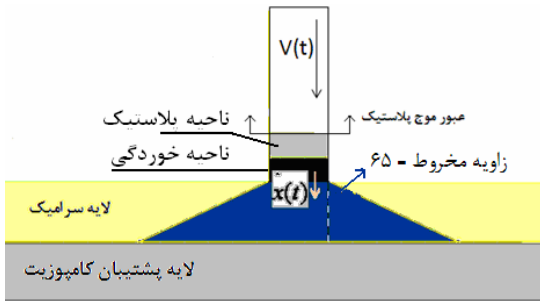
نقش اصلی سرامیک، ایجاد خوردگی و شکست در پرتابه است. کامپوزیت پشتیبان، انرژی جنبشی تکه‌های خرد شده را جذب و آنها را متوقف می‌کند. طراحی این زره‌ها واقعاً پیچیده بوده و به تجهیزات مدرن، جهت انجام تست‌های بالستیک نیاز دارد. در بررسی و تحلیل پدیده نفوذ در هدف سرامیک/کامپوزیت هر سه نوع رویکرد تجربی، تحلیلی و عددی مورد توجه قرار دارد. روش‌های تجربی به خاطر قابلیت اعتماد بالا مناسب‌ترین روش هستند؛ ولی اطلاعاتی در مورد تاریخچه بارگذاری و تغییرات به وجود آمده در طی پروسه نفوذ به ارائه نمی‌دهند و از طرفی بسیار پر هزینه می‌باشند.

1 -Tate

2- Fellows

3- Florence

4 -Chocron Benloulou



شکل (۱): توصیف فرآیند در پایان فاز اول.

پرتابه‌های به کار رفته در این مدل تحلیلی نفوذ، پرتابه‌ی تنگستنی و یا فولادی هستند که رفتار آن‌ها صلب-کاملاً پلاستیک با تنش تسلیم دینامیکی Y_p فرض می‌شود. هندسه این پرتابه‌ها، استوانه‌ای فرض شده است. در لحظه شروع فاز اول، سر پرتابه در اثر تماس با سطح سرامیک دچار خوردگی می‌شود که این بدین دلیل است که سرعت پرتابه بیشتر از سرعت موج پلاستیک بوده و باعث فرسایش و کاهش جرم پرتابه می‌شود [۲]. از طرفی با توجه به این که سرعت برخورد پرتابه در این نمونه بسیار بالاست، پرتابه در این فاز در داخل مخروط سرامیک با سرعت $\dot{x}(t)$ نفوذ می‌کند. پشت پرتابه نیز با سرعت $V(t)$ حرکت می‌کند. بنا بر معادله تیت [۱] می‌توان نوشت:

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (V - \dot{x})^2 = Y_c + \frac{1}{2} \rho_c \dot{x}^2, \quad \dot{x} > 0. \quad (2)$$

همچنین، بر اساس قانون دوم نیوتن و برای سرعت لحظه‌ای پرتابه $V(t)$ ، معادله زیر را در این فاز داریم:

$$M_p \frac{dV(t)}{dt} = -Y_p A_p. \quad (3)$$

در این فاز، معادله دیگر حاکم از شرایط هندسی پرتابه نتیجه می‌شود که به صورت زیر است:

$$\frac{dM_p}{dt} = -\rho_p A_p (V - \dot{x}). \quad (4)$$

A_p سطح مقطع است که ثابت فرض شده و ρ_p چگالی پرتابه است. شرایط اولیه برای معادله دیفرانسیل (۳)، سرعت برخورد اولیه V_s و برای معادله دیفرانسیل (۴) جرم اولیه پرتابه M_{p0} است. معادلات (۲-۴) معادلات حاکم بر فاز اول بوده و برای محاسبه $V(t)$ ، M_p و $\dot{x}(t)$ که سه مجهول مدل در این فاز می‌باشند، به کار می‌روند. این معادلات را می‌توان با روش اویلر یا رانگ کوتا حل نمود.

می‌باشد [۴] که در مقایسه با آن، زاویه مخروط سرامیکی و معادلات مومنتوم حاکم بر مخروط سرامیکی بهبود یافته و معیار تخریب الیاف کامپوزیت که زمان پایان فرآیند را می‌دهد نیز تغییر داده شده است. این مدل، کل فرآیند نفوذ را در دو فاز مجزا بررسی می‌کند. در فاز اول، سرامیک به صورت یک مخروط در حال شکست بوده و هیچ‌گونه نفوذی در الیاف مشاهده نمی‌شود. در فاز دوم، مخروط سرامیک شکل گرفته به همراه پرتابه، به الیاف پشتیبان کامپوزیت نفوذ می‌کند. در پایان هم نتایج استخراج شده از این مدل با نتایج حل عددی و نتایج مدل تحلیلی کوکرون مقایسه شده و تطابق بسیار خوبی به دست آمده است. در مواردی به واسطه اصلاحات انجام گرفته، نتایج حاصل از مدل حاضر هم‌خوانی بهتری نسبت به نتایج حاصل از مدل کوکرون، با نتایج حل عددی دارد.

۲- بسط مدل تحلیلی

همان‌طور که گفته شد، این مدل طی دو فاز مطرح است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱ فاز اول

فاز اول، از لحظه برخورد نوک پرتابه به صفحه سرامیکی آغاز شده و تا شکست کامل سرامیک به صورت مخروطی شکل ادامه دارد. مشاهدات نشان داده است که پس از برخورد پرتابه به سرامیک جلوی زره، ترک‌های سطحی به صورت مخروطی در طول ضخامت سرامیک رشد می‌کند و در نهایت مخروط در راستای ضخامت سرامیک به وجود می‌آید. زاویه این مخروط به سرعت اولیه پرتابه بستگی دارد [۱۰]. رابطه زیر برای زاویه مخروط شکسته شده سرامیکی برای سرعت‌های معلوم ارائه شده است [۱۰-۱۱]:

$$\varphi = \left(\frac{V_s(t) - 220}{780} \right) \frac{34\pi}{180} + \frac{34\pi}{180}. \quad (1)$$

شکل ۱ تصویر شماتیکی از فاز اول برخورد پرتابه به سرامیک و شکست مخروطی سرامیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هنوز هیچ‌گونه نفوذی به الیاف کامپوزیتی صورت نپذیرفته است.

- **حالت اول** $\dot{x}(t) < V(t)$ در این حالت با توجه به بالا بودن سرعت پرتابه نسبت به سرعت موج پلاستیک و در نتیجه خوردگی پرتابه، معادله تیت و آلکسیوسکی^۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y_p + \frac{1}{2} \rho_p (V - \dot{x})^2 = Y_c' + \frac{1}{2} \rho_c (\dot{x} - u_0)^2, \quad (5)$$

$$\dot{x} > u_0, V > \dot{x},$$

که در آن، Y_c' استحکام دینامیکی سرامیک‌های خرد شده است. برای اطلاعات دقیق‌تر از ترم‌هایی مثل Y_c', Y_p به مرجع [۱۳] رجوع شود.

با استفاده از قانون دوم نیوتن، شتاب منفی پرتابه در فاز دوم نیز به صورت معادله (۳) به دست می‌آید. البته شرایط اولیه در این فاز، با شرایط انتهایی فاز اول برابر است. معادله دیگر از شرایط هندسی و بقاء جرم و پیوستگی پرتابه متابعت می‌کند که برابر است با:

$$\frac{dM_p}{dt} = \rho_p A_p \dot{i},$$

$$\dot{i} = -(V - \dot{x}), \quad (6)$$

$$\frac{dM_p}{dt} = -\rho_p A_p (V - \dot{x}),$$

که در آن، $M_{p1}(t)$ در $t = t_1 = 6h/c$ به عنوان M_{p1} تعریف می‌شود که جرم پرتابه در انتهایی فاز اول است.

- **حالت دوم** $\dot{x}(t) = V(t)$: چنان‌چه سرعت ابتدا و انتهایی پرتابه، برابر باشد، یعنی $\dot{x}(t) = V(t)$ ، بیانگر این است که پرتابه صلب بوده و جرم آن ثابت باقی می‌ماند. حال اگر پرتابه دچار خوردگی نشود و صلب عمل کند، دو حالت زیر ممکن است به وجود آید:

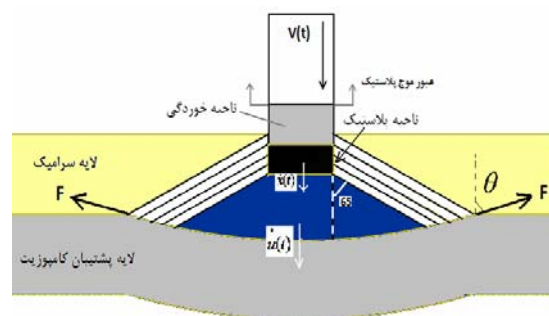
۱- سرعت نفوذ مخروط سرامیکی به الیاف کوچکتر از سرعت پرتابه است ($u_0(t) < V(t)$). در نتیجه اگر فشار ایجاد شده توسط پرتابه، بیشتر از استحکام فشاری سرامیک باشد، پرتابه به درون مخروط سرامیکی نفوذ می‌کند. تا اینکه سرامیک به‌طور کامل فرسایش یابد. رابطه حاکم بر این حالت مطابق قانون نیوتن برابر است با:

$$Mp_2 \frac{dV}{dt} = -Y_c' A_c, \quad (7)$$

دن‌ریجر^۱ [۱۲] زمان تشکیل مخروط سرامیکی که در واقع زمان انتهایی فاز اول و آغاز فاز دوم است را به صورت $t = 6h/c$ فرض کرد که h ضخامت تایل سرامیک و c سرعت صوت در سرامیک است. مقادیر Mp ، $V(t)$ و $\dot{x}(t)$ در $t = 6h/c$ به‌عنوان شرایط اولیه فاز دوم مطرح هستند.

۲-۲-۲- فاز دوم

فاز دوم در $t = 6h/c$ شروع می‌شود. در این فاز، پرتابه و مخروط سرامیکی به الیاف کامپوزیتی نفوذ کرده و الیاف، سعی در جذب انرژی پرتابه و توقف آن دارند. در این فاز، $V(t)$ سرعت لحظه‌ای پرتابه، $\dot{x}(t)$ سرعت سطح اثر لحظه‌ای سرامیک و پرتابه و $u_0(t)$ سرعت نفوذ مخروط سرامیک به پشتیبان کامپوزیتی است. اختلاف میان $V(t)$ و $\dot{x}(t)$ نرخ فرسایش پرتابه و همچنین اختلاف بین $\dot{x}(t)$ و $u_0(t)$ نفوذ پرتابه به مخروط سرامیکی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): توصیف فرآیند در فاز دوم.

شکل ۲ مکانیزم حاکم بر این فاز را نمایش می‌دهد. در این شکل θ ، زاویه الیاف تغییر فرم یافته با راستای برخورد F نیروی وارده از طرف الیاف کامپوزیت می‌باشد که در قسمت‌های بعد توضیح داده شده است.

۲-۲-۱- معادلات حاکم بر حرکت پرتابه

در حین برخورد و حرکت پرتابه به هدف سرامیکی دو حالت ممکن است اتفاق بیفتد:

متربرثانیه، موج عرضی زمان کافی برای پیشروی قبل از تخریب پائل نداشته و در نتیجه، انرژی جذب شده در اثر لایه‌لایه شدن خیلی کوچک است (کمتر از ۱٪ انرژی جنبشی اولیه پرتابه). در نتیجه می‌توان در برخوردهای با سرعت بالا از ترم $G\pi L^2 \dot{A}$ - بیان شده در معادلات (۸) به‌طور کلی صرف‌نظر کرد. ترم سوم سمت راست در معادله (۸)، نیروهای پرتابه روی مخروط سرامیک است. از این معادله در واقع برای پیدا کردن $\dot{u}_0(t)$ ، در هر لحظه می‌توان استفاده نمود. بدین صورت که حاصل $M_c \dot{u}_0$ ، برای هر گام زمانی محاسبه و با تقسیم آن بر $M_c(t)$ ، $\dot{u}_0(t)$ به‌دست می‌آید. $M_c(t)$ ، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{dM_c(t)}{dt} = (\dot{u}_0 - \dot{x}) A_p \rho_c, \quad (9)$$

$$\dot{u}_0 > \dot{x}, \quad M_c = 0, \quad u_0 = x.$$

همان‌طور که در معادله‌های (۹-۸) پیداست، ممکن است پس از مدت زمانی جرم مخروط سرامیکی به صفر برسد. در این حالت معادلات سرامیک از محاسبات مدل خارج شده و پرتابه و الیاف کامپوزیت، برهم‌کنش خواهند داشت که با شبیه‌سازی می‌توان، معادله (۸) را به‌صورت حاصل‌ضرب مومنتوم در سرعت- که انرژی را می‌دهد- بین پرتابه و کامپوزیت نوشت:

$$\frac{d(M_{p3} V_3(t))}{dt} u_0 = -2F \cos \theta - G\pi L^2 \dot{A} + Y_c' A_p \dot{u}_0. \quad (10)$$

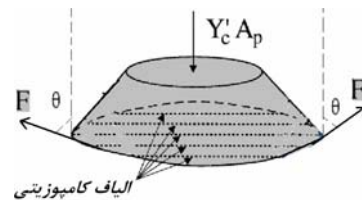
شرایط اولیه برای معادله جرم و سرعت پرتابه در لحظه $(M_c(t) = 0)$ می‌باشد. مطابق این رابطه از این لحظه به بعد الیاف کامپوزیتی مستقیماً در جذب انرژی پرتابه شرکت و سعی در توقف آن‌ها دارد. برای پرتابه‌های با کالیبر بالا (بالتر از ۱۰ میلی‌متر) با توجه به اینکه حجم مخروط سرامیک ایجاد شده زیاد است، تا انتهای فرآیند، جرم مخروط سرامیک صفر نخواهد شد و معادله (۱۰) از محاسبات مدل خارج می‌شود، ولی برای پرتابه کالیبر بسیار کوچک (حدود ۲/۳ میلی‌متر) با توجه به اینکه حجم مخروط سرامیکی ایجاد شده بسیار کم است، جرم مخروط به‌سرعت برابر با صفر شده و معادله (۱۰) وارد محاسبات مدل می‌شود و کاهش $V(t)$ ادامه می‌یابد (شکل ۴). کوکرون و گالوز در تحقیق خود از پرتابه‌های کالیبر بالا استفاده کرده‌اند. در نتیجه معادلات (۹-۸) تا پایان فرآیند نفوذ معتبر می‌باشد.

که در این حالت جرم پرتابه ثابت و برابر با جرم انتهایی حالت اول است.

۲- ممکن است سرعت مخروط، $u_c(t)$ قبل از پایان خوردگی کامل مخروط به سرعت پرتابه برسد یعنی مخروط صلب شود. در این حالت، مخروط و پرتابه به‌عنوان یک پرتابه جدید، به پشتیبان کامپوزیت نفوذ می‌کند.

۲-۲-۲- معادلات حاکم بر حرکت سرامیک

همان‌طور که گفته شد مخروط سرامیکی از انتهای فاز اول به بعد شروع به حرکت و نفوذ در الیاف می‌کند که از یک طرف توسط پرتابه هل داده می‌شود و از طرف دیگر پشتیبان کامپوزیتی نیروی رو به بالا به آن وارد می‌کند. شکل ۳ نیروهای فعال روی مخروط سرامیکی در طول فرآیند برخورد را نشان می‌دهد.



شکل (۳): نیروهای فعال روی سرامیک طی فرآیند برخورد.

معادله حاکم بر حرکت مخروط از قانون دوم نیوتن پیروی می‌کند که البته جرم مخروط در آن متغیر و تابع زمان است. این معادله، معادله مومنتوم است که با ضرب مولفه سرعت $\dot{u}_0(t)$ در دو طرف، ترم‌های انرژی حاصل شده است [۴].

$$\frac{d(M_c \dot{u}_0)}{dt} \dot{u}_0 = -2F \cos \theta - G\pi L^2 \dot{A} + Y_c' A_p \dot{u}_0, \quad (8)$$

$$\dot{u}_0(t = t_1) = 0,$$

که در آن، M_c جرم مخروط سرامیکی، A درصد حجمی لایه‌لایه شده و L طول مشخصه پشتیبان است. ترم $G\pi L^2 \dot{A}$ ، در معادله (۸) مقدار انرژی اتلافی به‌ازای واحد زمان را به‌علت لایه‌لایه شدن به‌دست می‌دهد. G ، انرژی مورد نیاز برای لایه‌لایه کردن یک متر مربع کامپوزیت بر حسب J/m^2 می‌باشد. این ترم فقط در سرعت‌های برخورد پایین دارای اهمیت بوده و برای سرعت‌های بالاتر از ۱,۰۰۰

میان الیاف تغییر فرم یافته و راستای برخورد را نیز به صورت زیر ارائه کرد:

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{2\varepsilon\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon^2}}{\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)}} \quad (12)$$

نیروی الیاف روی مخروط سرامیکی مطابق معادله (۸) و یا روی پرتابه مطابق معادله (۱۰) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$F = E \varepsilon S n_l n_y \quad (13)$$

که در آن، E مدول یانگ، S سطح مقطع الیاف، n_l تعداد لایه‌ها و n_y تعداد الیاف است که مستقیماً در تماس با ضربه‌زن قرار دارد. فرض می‌شود همه الیاف کرنش یکسان دارند. حال، فرمول تحلیلی نفوذ پرتابه در هدف سرامیک/کامپوزیتی کامل شده و می‌توان با ارائه مقادیر ورودی، داده‌های خروجی را از مدل استخراج کرد. معادلات بالا برای یافتن ۹ مجهول $V(t), M_p(t), \dot{x}(t), \dot{u}_0(t)$ به‌طور هم‌زمان به‌کار می‌روند.

۲-۲-۴- تخریب پشتیبان کامپوزیتی، پایان فرآیند نفوذ

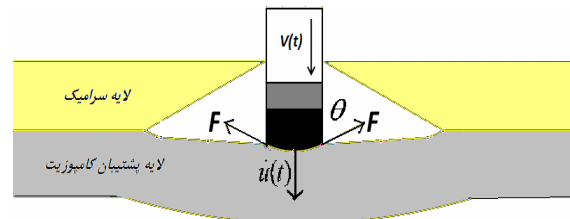
کوکرون رابطه (۱۴) را بر اساس مکانیزم تخریب کامپوزیت به‌منظور محاسبه پایان فرآیند تخریب به صورت زیر ارائه کرده است:

$$R_i = R_o \left(\frac{M_{pi}}{M_{po}} \right)^{2/3} \frac{n_{yo}}{n_{yi}} \quad (14)$$

که در آن، پارامتر R_i به جرم پرتابه (M_p) و تعداد الیاف زیر پرتابه (n_y) که در واقع تعداد الیاف یا تار و پود موجود در یک متر مربع سطح پارچه کامپوزیت است بستگی دارد. پارامتر R_i ثابت تخریب نام دارد. زیرنویس "۰" در پارامترها به‌عنوان حالت مرجع و زیرنویس "i" مقادیر مجهول مورد نیاز حل را می‌رساند. با محاسبه R_i پارامتر تخریب از رابطه (۱۴) و جای‌گزینی آن در رابطه زیر، t_f زمان تخریب الیاف که در واقع زمان پایان یافتن فرآیند نفوذ و عبور یا توقف پرتابه است به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$\int_0^{t_f} \varepsilon^2 dt = R \quad (15)$$

ولی اگر در مدل از پرتابه‌های کالیبر کوچک استفاده شود، از زمانی به بعد برهم‌کنش بین پرتابه و کامپوزیت انجام می‌پذیرد. به‌عبارت دیگر معادلات، اضافه شده و اصلاحات صورت گرفته در معادلات حاکم بر مخروط سرامیک، طیف استفاده از مدل تحلیلی نفوذ ارائه شده برای پرتابه‌های مختلف از لحاظ هندسی را زیاد کرده است.



شکل (۴): ادامه نفوذ در حالت صفر شدن جرم مخروط سرامیک.

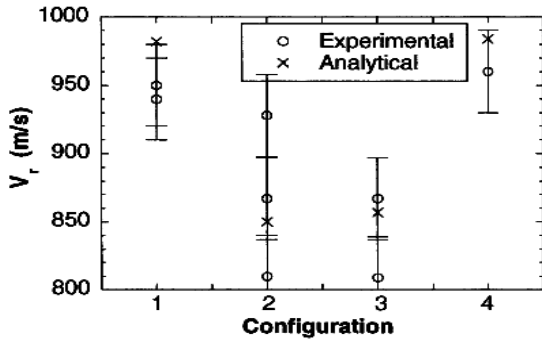
۲-۲-۳- معادلات حاکم بر حرکت کامپوزیت

در این بخش یک مدل بر اساس کارهای قبلی محققینی چون بیومنت^۱، کانیف^۲، ناوارو^۳ و رویلنس^۴ ارائه خواهد شد [۱۶-۱۳]. پایه و اساس این مدل، همچنین کارهای انجام گرفته کوکرون، روی برخورد به سرامیک با پشتیبان کامپوزیت می‌باشد که در بخش معیار تخریب الیاف کامپوزیت و زمان پایان فرآیند، با مدل ایشان تفاوت‌هایی دارد [۴]. این مدل با آلومینا/دینما و آلومینا/کولار کنترل و نتایج تحلیلی به‌دست آمده با نتایج حل عددی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. موقعی که پرتابه به الیاف الاستیک خطی برخورد می‌کند، سرعت $\dot{u}_0(t)$ پرتابه و کرنش محوری ε رابطه‌ای به شکل زیر با هم دارند:

$$\dot{u}_0 = c_y \sqrt{2\varepsilon\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon^2} \quad (11)$$

این معادله، حل تحلیلی پیدا شده توسط اسمیت^۵ برای سرعت لحظه‌ای ثابت بوده و برای مواردی که سرعت لحظه‌ای پرتابه غیر ثابت باشد نیز معتبر می‌باشد [۱۷]. c_y بزرگی سرعت صوت در الیاف کامپوزیت است. اسمیت زاویه

1- Beaumont
 2- Cunniff
 3- Navarro
 4- Roylance
 5- Smith



شکل (۵): مقایسه سرعت باقی مانده به دست آمده از مدل تحلیلی کوکرون با داده‌های آزمایشگاهی برای پرتابه ۲۰ mm APDS در سرعت ۱۲۵۰ m/s [۴].

جدول (۱): داده‌های به کار رفته در مدل تحلیلی [۴].

داده های ورودی	نماد	مقدار	واحد
جرم اولیه پرتابه	M_p	۷۲	گرم
قطر پرتابه	D_p	۱۲	میلی متر
طول اولیه پرتابه	L_0	۳۵/۲	میلی متر
سرعت اولیه	V_0	۱۲۵۰	متر بر ثانیه
چگالی پرتابه	ρ	۱۸۱۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب
تنش تسلیم دینامیکی پرتابه	Y_p	۳/۲	گیگا پاسکال
چگالی سرامیک	ρ_c	۳۸۴۰	کیلوگرم بر متر مکعب
سرعت صوت در سرامیک	c	۱۰۰۰۰	متر بر ثانیه
ضخامت سرامیک	hc	۲۰	میلی متر
تنش تسلیم دینامیکی سرامیک	Y_c	۷/۵	گیگا پاسکال
تنش تسلیم سرامیک خرد شده	Y'_c	۳/۲	گیگا پاسکال
مدول الاستیک الیاف	E	۱۰۰	گیگا پاسکال
سطح مقطع الیاف	S	۲۱/۵	سانتی متر مربع
تعداد الیاف در یک متر فیبر	n_y	۱۶۵۰	یک بر متر
تعداد لایه‌ها	n_l	۱۳۰	-
سرعت صوت در کامپوزیت	c_y	۱۰۰۰۰	متر بر ثانیه

راه پیشنهادی مدل حاضر، تعیین زمان پایان فرآیند نفوذ بر اساس محاسبه عمق نفوذ است. در این روش، در صورتی که عمق نفوذ برابر با ضخامت کل تایل سرامیک/کامپوزیت شود و یا قبل از آن $\frac{du_0}{dt} = 0$ شود و پرتابه متوقف گردد، پایان فرآیند نفوذ است و زمان پایان و توقف مدل قابل محاسبه خواهد بود. در حالت اول یعنی عبور پرتابه، سرعت باقی مانده پرتابه (V_{res}) و سرعت حد بالستیک (V_b) قابل محاسبه خواهد بود. در صورت رخداد حالت دوم یعنی عدم عبور پرتابه از هدف، می توان عمق نفوذ نهایی را به عنوان خروجی از مدل استخراج نمود.

۳- مقایسه نتایج مدل تحلیلی کوکرون-گالوز و داده‌های آزمایشگاهی

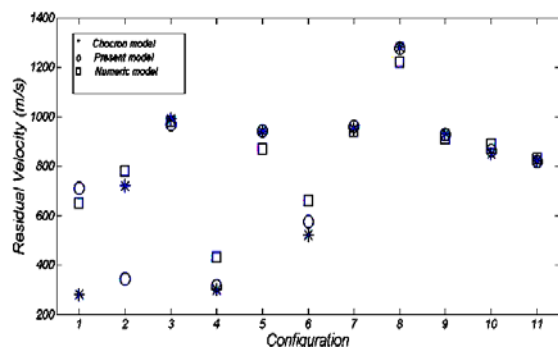
کوکرون و گالوز نتایج مدل تحلیلی خود را با برخی تست‌های انجام گرفته مقایسه کرده‌اند. تست‌ها شامل شلیک یک پرتابه تنگستنی ۷۲ گرمی در سرعت ۱,۲۵۰ متر بر ثانیه است که به یک هدف سرامیکی (آلومینای ۹۹/۵٪) با پشتیبان کامپوزیتی دینما برخورد می‌کند. سرعت باقی مانده پرتابه به وسیله سیستم‌های داپلر^۱ اندازه‌گیری می‌شود که در آن، فرآیند برخورد در معرض پنج اشعه X مختلف ثبت می‌شود و امکان اندازه‌گیری طول باقی مانده پرتابه وجود دارد. در جدول ۱ داده‌های ورودی برای اجرای مدل تحلیلی منطبق با شرایط مذکور آزمایشگاهی ارائه شده است.

شکل‌های (۵-۶) مقایسه میان نتایج تحلیلی مدل کوکرون و داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفته توسط ENSB^۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بین نتایج مدل تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی، همخوانی خوبی وجود داشته و با توجه به اینکه مدل تحلیلی کوکرون و گالوز زیربنای مدل حاضر می‌باشد این نمودارها در ادامه ارائه شده است. نتایج تحلیلی مدل کوکرون تطابق خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. از این‌رو در صورت تطابق نتایج مدل تحلیلی حاضر با نتایج مدل تحلیلی کوکرون می‌توان بر اعتبار این نتایج صحه گذاشت.

1- Doppler

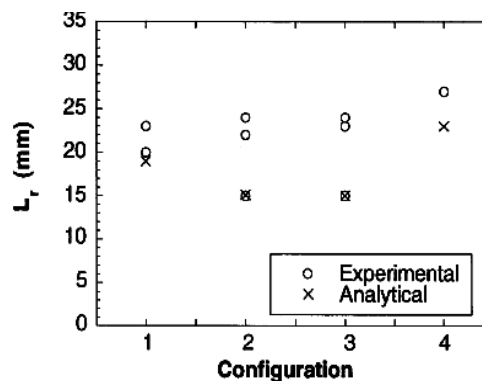
2- Empresa National Santa Barbara

بر حسب سرعت برخورد در شکل ۸ آمده که برای تایل ۲۰ میلی‌متر سرامیک و ۲۰ میلی‌متر کامپوزیت دینما و پرتابه ۴۱/۷ گرمی رسم شده است. یافته‌های عددی و منحنی تحلیلی بر اساس مدل کوکرون نیز در این نمودار آمده است. مشاهده می‌شود که نتایج عددی و تحلیلی تطابق خیلی خوبی داشته ولی در هنگامی که به حد بالستیک میل می‌کند، اختلافات مشهود است. زیرا در نزدیکی حد بالستیک، نسبت سرعت باقی‌مانده به سرعت اولیه به شرایط اولیه خیلی وابسته است. یعنی تغییر کوچکی در سرعت برخورد، موجب تغییری بزرگ در سرعت باقی‌مانده می‌شود [۴]. شیب منحنی V_r بر حسب V_s در حد بالستیک در حقیقت از لحاظ تئوری نامحدود است. این مسئله در آزمایش‌های گزارش شده توسط آندرسون نیز مشاهده شده است [۱۸]. در نزدیکی حد بالستیک جزئیات فرآیند تخریب بسیار حائز اهمیت است. در نتیجه، مدل‌های عددی و تحلیلی، مدل‌های تخریب متفاوتی داشته و انتظار می‌رود که تطابق نتایج در نزدیکی حد بالستیک خیلی چشم‌گیر نباشد. شبیه‌سازی عددی نمودارهای تاریخچه بارگذاری، جابجایی‌ها و سرعت‌ها را نیز می‌تواند ارائه دهد. شکل ۹ نمودار سرعت-زمان پرتابه را برای شبیه‌سازی عددی و مدل تحلیلی کوکرون و مدل تحلیلی پیش‌رو نشان می‌دهد.



شکل (۷): نمودار مقایسه سرعت‌های باقی‌مانده به دست آمده از مدل‌های تحلیلی و حل عددی مطابق جداول ۲ و ۳.

در شکل ۵ طول باقی‌مانده پرتابه از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل با هم مقایسه شده‌اند. در این مقاله، برای ارزش‌گذاری مدل تحلیلی حاضر، نتایج به دست آمده از حل معادلات مذکور، با نتایج حل عددی و تحلیلی موجود در [۴] مقایسه شده است که تطابق بالایی بین نتایج مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است شبیه‌سازی عددی انجام گرفته در [۴]، با هیدروکد دو بعدی AUTODYN صورت گرفته است.



شکل (۶): مقایسه طول باقی‌مانده به دست آمده از مدل تحلیلی کوکرون با داده‌های آزمایشگاهی برای پرتابه ۲۰ mm APDS در سرعت ۱۲۵۰ m/s [۴].

۴- نتایج مدل تحلیلی حاضر و مقایسه آن با نتایج تحلیلی و عددی محققین دیگر

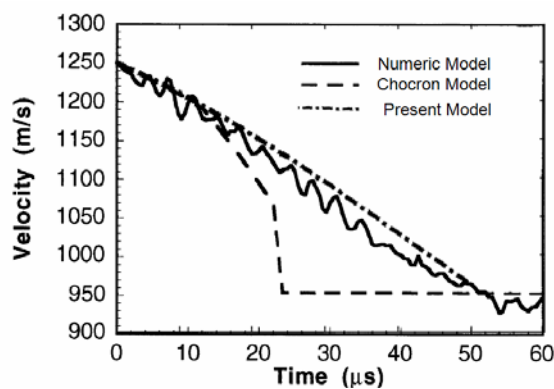
AUTODYN یک هیدروکد تجاری است که جهت مسائل شبیه‌سازی برخورد در سرعت‌های بالا طراحی شده است. خصوصیات مواد به‌طور مستقیم از منابع وارد مسئله می‌شود. ۱۱ حالت بیان شده در جداول (۲-۳) نیاز به حدود ۱۰۰ ساعت محاسبه در رایانه شخصی دارد. دو نوع مختلف پرتابه ۴۱/۷ گرمی و ۱۱۴/۳ گرمی به‌منظور اجرای مدل تحلیلی انتخاب شد. جدول ۲ خلاصه‌ای از ترکیبات به کار رفته برای پرتابه ۴۱/۷ گرمی و زره‌های مختلف را نشان می‌دهد که از آن می‌توان سرعت و طول باقی‌مانده پرتابه را استخراج نمود. جدول ۳ هم خلاصه نتایج برای پرتابه ۱۱۴/۳ گرمی است. نمودار نتایج مدل تحلیلی و مقایسه با نتایج مدل تحلیلی کوکرون در شکل‌های (۷-۸) آمده است. سرعت باقی‌مانده

جدول (۲): مقایسه نتایج مدل‌های تحلیلی و حل عددی برای پرتابه تنگستنی با قطر ۱۰ میلی‌متر و جرم ۴۱/۷ گرم.

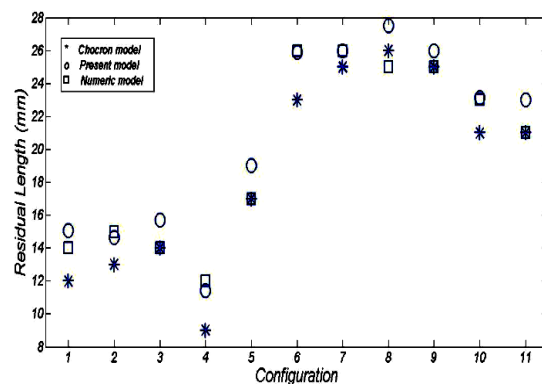
L _r (mm)			V _r (m/s)			ضخامت تایل کامپوزیتی (mm)	ضخامت تایل سرامیکی (mm)	سرعت برخورد	نمونه
شبهه‌سازی عددی [۴]	مدل کوکرون [۴]	مدل حاضر	شبهه‌سازی عددی [۴]	مدل کوکرون [۴]	مدل حاضر				
۱۴	۱۲	۱۵/۰۶	۶۵۰	۲۸۰	۳۴۴	۲۰	۲۰	۱۱۰۰	۱
۱۵	۱۳	۱۴/۶۴	۷۸۰	۷۲۰	۷۱۰	۲۰	۲۰	۱۲۵۰	۲
۱۴	۱۴	۱۵/۷	۹۸۰	۹۹۰	۹۶۸	۲۰	۲۰	۱۴۰۰	۳
۱۲	۹	۱۱/۴	۴۳۰	۳۰۰	۳۱۶	۲۰	۲۵	۱۲۵۰	۴
۱۷	۱۷	۱۹	۸۷۰	۹۴۰	۹۴۳	۱۵	۱۵	۱۲۵۰	۵

جدول (۳): مقایسه نتایج مدل‌های تحلیلی و حل عددی برای پرتابه تنگستنی با قطر ۱۴ میلی‌متر و جرم ۱۱۴/۳ گرم.

L _r (mm)			V _r (m/s)			ضخامت تایل کامپوزیتی (mm)	ضخامت تایل سرامیکی (mm)	سرعت برخورد	نمونه
شبهه‌سازی عددی [۴]	مدل کوکرون [۴]	مدل حاضر	شبهه‌سازی عددی [۴]	مدل کوکرون [۴]	مدل حاضر				
۲۶	۲۳	۲۵/۹	۶۶۰	۵۲۰	۵۷۷	۲۰	۲۰	۱۰۰۰	۶
۲۶	۲۵	۲۶	۹۴۰	۹۵۰	۹۶۱	۲۰	۲۰	۱۲۵۰	۷
۲۵	۲۶	۲۷/۵	۱۲۲۰	۱۲۸۰	۱۲۷۶	۲۰	۲۰	۱۵۰۰	۸
۲۵	۲۵	۲۶	۹۱۰	۹۳۰	۹۲۸	۲۵	۲۰	۱۲۵۰	۹
۲۳	۲۱	۲۳/۱۴	۸۹۰	۸۵۰	۸۶۳	۲۰	۲۵	۱۲۵۰	۱۰
۲۱	۲۱	۲۳	۸۳۰	۸۲۰	۸۱۸	۲۵	۲۵	۱۲۵۰	۱۱



شکل (۹): سرعت لحظه‌ای پرتابه بر حسب زمان - تحلیلی و عددی.



شکل (۸): نمودار مقایسه طول‌های باقی‌مانده به‌دست آمده از مدل‌های تحلیلی و حل عددی مطابق جداول ۲ و ۳.

نفوذ پرتابه مذکور برای دو سرعت ۱,۵۰۰ و ۲,۰۰۰ متر بر ثانیه به هدف سرامیک/کامپوزیت با فرضیات فوق‌الذکر بررسی و نتایج در ادامه ارائه خواهد شد.

۵-۱- مقایسه نتایج مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی و بحث و بررسی

پس از اعمال دقیق تمام نکات لازم در کد نویسی و برطرف نمودن خطاهای موجود، حل تحلیلی قابل ارائه می‌باشد. در این بخش، نتایج شبیه‌سازی عددی پرتابه فولادی در برخورد با هدف سرامیک/کامپوزیتی با نتایج ارائه شده از مدل تحلیلی حاضر مقایسه می‌شود تا رفتار و میزان نفوذ پرتابه را بتوان در هر دو روش حل بررسی کرد. سرعت برخورد نیز ۱,۵۰۰ و ۲,۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

۵-۱-۱- برخی داده‌ها و خواص مورد نیاز برای مدل تحلیلی

در این مسئله پرتابه مورد نظر از جنس فولاد با جرم ۰/۸۸۴۸ گرم و قطر ۲/۳ میلی‌متر است. سرامیک مورد استفاده نیز آلومینا ۹۹/۵٪ با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بوده و از ۵۳ لایه کولار ۴۹ به‌عنوان الیاف کامپوزیت استفاده شده است.

۵-۱-۲- روند شبیه‌سازی عددی

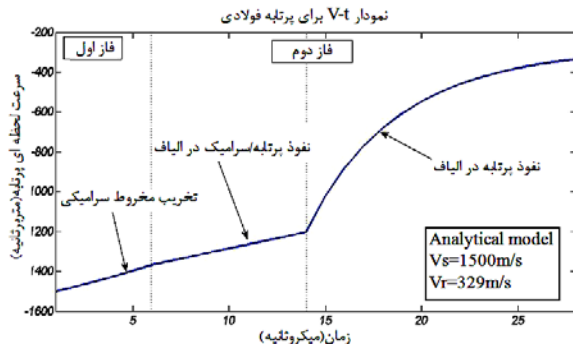
شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار LS-DYNA، انجام گرفته است. این نرم‌افزار، یک حل‌گر قوی در شبیه‌سازی مسائل ضربه و نفوذ می‌باشد که مسائل را بر پایه انتگرال زمانی صریح حل می‌کند. برای مسئله حاضر، پرتابه و هدف به‌صورت متقارن محوری مدل شده و برای مش‌بندی از المان‌های مربعی استفاده گردیده است. با توجه به بالا بودن نرخ کرنش در پرتابه، از مدل ماده جانسون-کوک استفاده شده است. همچنین بر اساس مطالعات انجام گرفته، مدل ماده جانسون-هالمکوئیست برای توصیف رفتار ماده سرامیک به‌کار رفته است [۱۹]. ضرایب به‌کار رفته برای این مدل ماده، جهت توصیف رفتار آلومینای ۹۹/۵٪ در جدول ۴ آمده است. برای توصیف رفتار ماده کامپوزیت، نیز از مدل ماده

مطابق شکل ۹، تا زمان (۱۲-۱۱) میکروثانیه اول که تقریباً فاز اول طی می‌شود با توجه به یکسان بودن هر دو مدل تحلیلی، منحنی‌ها بر هم منطبقند، که نشان از اعتبار مدل تیت برای فاز اول می‌باشد. اختلافات چشم‌گیر از فواصل ۱۱ میکروثانیه به‌بعد شروع می‌شود. در این بازه علی‌رغم این‌که مدل تحلیلی حاضر و شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی را نشان می‌دهند، مدل کوکرون با افت عجیبی در منحنی روبرو می‌شود. طبق توضیحات ارائه شده در مقالات کوکرون این اختلاف، از مدل تحلیلی فرض شده برای توصیف کامپوزیت ناشی می‌شود که مطابق این مدل-که در [۴] به‌طور کامل بیان شده است-کامپوزیت در شرایط حاکم در برخورد مذکور در حدود ۲۰ میکروثانیه تخریب می‌شود؛ ($t_r = 20$). این در حالی است که با فرضیات انجام گرفته در مدل حاضر ۶۰- $t_r = 50$ میکروثانیه می‌باشد که به نتایج شبیه‌سازی عددی نزدیک‌تر است.

۵- بررسی نفوذ یک پرتابه فولادی میله‌ای بلند کالیبر کوچک در یک هدف سرامیک / کامپوزیت

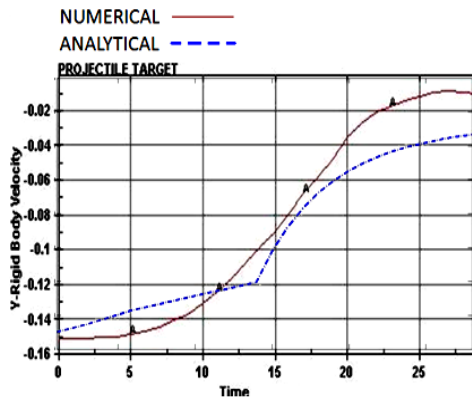
در این بخش نفوذ یک پرتابه میله‌ای بلند فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پرتابه میله‌ای بلند انرژی جنبشی به پرتابه‌ای گفته می‌شود که به‌سبب سرعت برخورد بسیار بالا، انرژی جنبشی بالایی نیز دارد. از دیگر خصوصیات این پرتابه، کوچک بودن قطر آن و زیاد بودن نسبت طول به قطر آن است. در نتیجه با توجه به خاص بودن نوع پرتابه در این مسئله (کوچک بودن قطر و جرم پرتابه و نسبت طول به قطر بسیار بالا)، جرم مخروط سرامیکی حاصل طی فرآیند نفوذ، قبل از پایان فرآیند و عبور پرتابه تمام شده معادلات (۹-۸) عملاً از چرخه حل خارج شده و در ادامه، معادله (۱۰) وارد چرخه حل می‌شود. به‌عبارت دیگر، حل این مسئله با مدل تحلیلی کوکرون امکان‌پذیر نیست؛ چون کوکرون برای حالت مذکور (صفر شدن جرم مخروط سرامیکی) معادله‌ای ارائه نکرده است. این پرتابه از جنس فولاد پر کربن و سردکار با قطر ۲/۳ و طول ۲۵ میلی‌متر است.

هدف مورد نظر از یک لایه آلومینا به‌عنوان سرامیک و ۵۳ لایه الیاف کولار ۴۹ با ضخامت کل ۹ میلی‌متر می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودار تغییر سرعت برای پرتابه فولادی، حل تحلیلی، سرعت برخورد ۱,۵۰۰ متر بر ثانیه.

نمودار مقایسه‌ای تاریخچه سرعت بر حسب زمان برای این حالت از حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی مطابق شکل ۱۱ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود که نمودار سرعت لحظه‌ای پرتابه به‌روشنی به‌روشنی حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی، تطابق نسبتاً خوبی دارد. با استفاده از روش حل تحلیلی، سرعت خروج در انتها به حدود ۳۲۹ متر بر ثانیه می‌رسد. در حالی که در حل شبیه‌سازی عددی، سرعت باقی‌مانده حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه است.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج سرعت لحظه‌ای از حل تحلیلی و عددی برای پرتابه فولادی سرعت برخورد ۱,۵۰۰ متر بر ثانیه.

۵-۱-۴- نتایج برخورد گلوله فولادی با سرعت ۲,۰۰۰ متر بر ثانیه

شکل ۱۲، تغییرات سرعت گلوله فولادی با سرعت اولیه ۲,۰۰۰ متر بر ثانیه را در برخورد با هدف سرامیکی با

ارتوتروپیک استفاده شده و ضرایب این مدل نیز مطابق با مرجع [۲۰] می‌باشد.

جدول (۴): پارامترهای مدل جانسون-هالمکوئیست آلومینا [۱۹].

واحد	پارامتر	مقدار	توصیف
kg / m^3	ρ	۳۸۰۰	دانسیتته
GPa	G	۹۰/۱۶	مدول برشی
-	A	۰/۹۳	-
-	B	۰/۳۱	-
-	C	۰	-
-	M	۰/۶	-
-	N	۰/۶	-
$1/s$	ϵ	۱	نرخ کرنش
MPa	Sf_{max}	۰/۲	استحکام کششی
-	D_1	۰/۰۰۵	پارامتر تخریب
-	D_2	۱	"
-	K_1	۱۳۰/۹۵e9	مدول بالک
-	K_2	0	"
-	K_3	0	"

در پایان شبیه‌سازی، پس از اعمال شرایط مرزی و اولیه و پارامترهای کنترلی، فایل notepad مسئله، به حل‌گر LS-DYNA وارد شده و فرآیند حل انجام می‌شود.

۵-۱-۳- نتایج برخورد گلوله فولادی با سرعت ۱,۵۰۰ متر بر ثانیه

شکل ۱۰، تغییرات سرعت گلوله فولادی با سرعت اولیه ۱,۵۰۰ متر بر ثانیه را در برخورد با هدف سرامیکی با پشتیبان کامپوزیت، نشان می‌دهد که به‌روشنی مدل تحلیلی ارائه شده در مقاله به‌دست آمده است. سایر جزئیات مربوط به مدل تحلیلی و روند شکل‌گیری فازها و نیز تغییرات سرعت پس از پایان یافتن جرم مخروط سرامیکی و درگیری مستقیم پرتابه با الیاف کامپوزیت و سرعت باقی‌مانده نهایی پس از خروج پرتابه از هدف در شکل ۱۰ آمده است.

که در حل شبیه‌سازی عددی سرعت باقی‌مانده حدود ۴۲۵ متر بر ثانیه است.

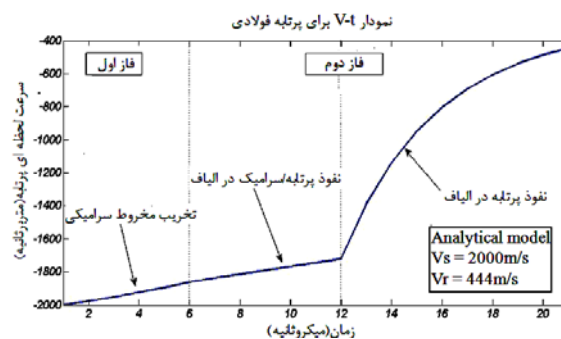
۵-۲- بحث در مورد نتایج حل مسئله

همان‌طور که مطرح شد اختلاف موجود بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی عددی ناشی از دقیق نبودن بسیاری از ورودی‌های لازم برای روش شبیه‌سازی می‌باشد و تعدادی از متغیرهای لازم برای شبیه‌سازی کلاً در دسترس نمی‌باشند. با این حال با توجه به مقادیر انتخاب شده، سرعت‌های خروجی و روند تغییرات آنها منطقی به نظر می‌رسد. مسئله دیگر که در این بخش با آن مواجه هستیم، نوع و شکل پرتابه می‌باشد که بسیار خاص بوده و در هیچ منبعی نظیر آن یافت نمی‌شود. لذا نتایج تجربی از آن در دسترس نیست. زیرا اولاً پرتابه مورد بحث بسیار سبک می‌باشد و وزنی در حدود یک گرم دارند. ثانیاً قطر آن بسیار کم بوده و نسبت طول به قطر بیش از ۱۰ می‌باشد. در حالی که در اکثر موارد، پرتابه‌هایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که نسبت طول به قطر آن‌ها در حدود ۵ می‌باشد. لذا این مسئله می‌تواند هم بر روی شبیه‌سازی و هم بر روی روش تحلیلی اثرگذار باشد. اما نهایتاً با توجه به اینکه هدف از بررسی این مسئله، این است که مشخص شود آیا پرتابه‌ای با چنین مشخصاتی می‌تواند زره را سوراخ کند یا خیر؟ در جواب باید گفت این مسئله در تمام حالات ذکر شده اتفاق می‌افتد که هم مدل تحلیلی و هم شبیه‌سازی عددی این مسئله را تأیید می‌نماید.

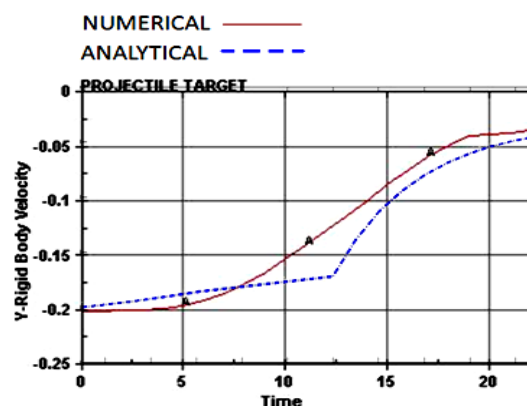
- خلاصه بحث

آنچه در این مقاله ارائه شد، توسعه یک مدل تحلیلی نفوذ پرتابه به هدف سرامیک/کامپوزیت است که در قسمت ابتدای مقاله این مدل به‌طور کامل بررسی شد. پایه و اساس مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله، همان مدل تحلیلی کوکرون می‌باشد که در شرط توقف برنامه و پایان فرآیند نفوذ، با این مدل اختلاف دارد. همچنین در قسمتی که معادلات سرامیک توضیح داده شده است، برای حالاتی که جرم مخروط سرامیک قبل از پایان فرآیند نفوذ تمام شود، معادلاتی اضافه و اصلاحاتی صورت گرفته است.

پشتیبان کامپوزیت، نشان می‌دهد که به‌روش مدل تحلیلی ارائه شده در مقاله به‌دست آمده است.



شکل (۱۲): نمودار تغییر سرعت برای پرتابه فولادی، حل تحلیلی، سرعت برخورد ۲,۰۰۰ متر بر ثانیه.



شکل (۱۳): مقایسه نتایج سرعت لحظه‌ای از حل تحلیلی و عددی برای پرتابه فولادی سرعت برخورد ۲,۰۰۰ متر بر ثانیه.

نمودار مقایسه‌ای تاریخچه سرعت بر حسب زمان برای این حالت از حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی مطابق شکل ۱۳ است. در واقع محور عمودی در شکل‌های ۱۱ و ۱۳، میانگین سرعت لحظه‌ای گره‌های کل پرتابه را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در این نمودارها سرعت بر حسب سانتی‌متر بر میکروثانیه و زمان بر حسب میکروثانیه است. مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که نمودار سرعت لحظه‌ای پرتابه به‌روش حل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی تطابق نسبتاً خوبی دارد. با استفاده از روش حل تحلیلی، سرعت خروج در انتها به حدود ۴۴۴ متر بر ثانیه می‌رسد. این در حالی است

• تطابق نسبی موجود در نتایج مدل تحلیلی و شبیه‌سازی عددی در مسئله برخورد پرتابه میله‌ای بلند به هدف سرامیک/کامپوزیت نشان از اعتبار مدل ارائه شده می‌باشد. اختلافات موجود بین نتایج حاصله به دلیل دقیق نبودن برخی از پارامترها و ثوابت تجربی است که به‌عنوان ورودی برای شبیه‌سازی عددی و مدل تحلیلی نیاز است.

مراجع

1. Tate, A., "A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 14, No. 6, pp. 387-399, 1967.
- ۲- خداحمی، ح.، لیاقت، غ. و فلاحی‌آرزودار، ع.، "بررسی تئوری هیدرودینامیکی نفوذ پرتابه‌های انرژی جنبشی بلند"، هفتمین کنفرانس بین‌المللی اجمن مهندسان مکانیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، فروردین ۱۳۷۸.
- ۳- رادمهر، د. و لیاقت، غ.، "تحلیل فرآیند نفوذ عمودی پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر سر پخ در اهداف فلزی"، مجله مکانیک هوافضا، جلد ۴، شماره ۴، ص.ص. ۴۱-۵۴، زمستان ۸۷.
4. Chocron Benloulou, I.S., and Sanchez Galvez, V., "A New Analytical Model to Simulate Impact onto Ceramic/ Composite Armors" Int. J. Impact Eng., Vol. 21, No. 6, pp. 461-471, 1998.
5. Shokrieh, M.M., and Javadpour, G.H., "Penetration Analysis of a Projectile in Ceramic/Composite Armor" Int. J. Impact Eng., Vol. 82, No.2, pp.269-276, 2008.
6. Naik, N.K., Shrirao, P., and Reddy, B.C.K., "Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Formulation", Int. J. Impact Eng. Vol. 32, No. 9, pp. 1521-1552, 2006.
7. Bohong, G.U., "Analytical Modeling for the Ballistic Perforation of Planar Plain-Woven Fabric Target by Projectile", Int. J. Impact Eng. Vol. 34, No. 4, pp. 361-371, 2003.
8. Lo'pez-Puente, J., Zaera, R., and Navarro, C., "An Analytical Model for High Velocity Impacts on Thin CFRPs Woven Laminated Plates", Int. J. Impact Eng., Vol. 44, No. 9, pp. 2837-2851, 2007.

نتایج ارائه شده در این مقاله، به‌طور مستقیم با تست‌های تجربی مقایسه نشده است اما از آنجا که معادلات حاکم بر مدل حاضر، مطابق با معادلات استفاده شده در مدل کوکرون است، به‌منظور ارزیابی اعتبار مدل، در بخشی از مقاله، نتایج مقایسه‌ای مدل تحلیلی کوکرون با داده‌های آزمایشگاهی و تطابق بالای آنها ارائه شده است. هم‌خوانی نتایج مدل حاضر با نتایج مدل کوکرون، به نوعی هم‌خوانی با نتایج حاصل از تست‌های بالستیک ارائه شده در [۴] را نشان می‌دهد. در پایان هم برای بررسی و صحت اعتبار مدل تحلیلی ارائه شده در مقاله، بررسی نفوذ یک پرتابه میله‌ای بلند، به یک هدف سرامیک/کامپوزیتی انجام شد که بنا بر توضیحات ارائه شده در بخش ۲-۲-۲، با مدل تحلیلی کوکرون نمی‌توان آن را حل نمود و بررسی این مسئله با مدل تحلیلی اصلاح شده در این مقاله انجام شد و نتایج به‌دست آمده از مدل تحلیلی موجود با نتایج شبیه‌سازی عددی انجام گرفته با نرم‌افزار LS-DYNA مقایسه و تطابق نسبتاً خوبی مشاهده شد که البته دلایل اختلافات موجود بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی، در بخش ۵-۲ توضیح داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این مقاله به‌صورت زیر قابل بیان است:

- مدل تحلیلی کوکرون در حالاتی که هندسه و جرم پرتابه بسیار کوچک شود، جواب صحیح نمی‌دهد و نیاز به اصلاحات و تغییرات دارد. مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله ایراد مذکور را برطرف کرده و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.
- مدل حاضر، شرط توقف و پایان فرآیند نفوذ را برابری عمق نفوذ با ضخامت کل تایل و یا صفر شدن نرخ نفوذ در نظر می‌گیرد که نتایج حاصله، با نتایج به‌دست آمده از مدل کوکرون، که شرط توقف را تخریب الیاف کامپوزیت گرفته (معادله ۱۶) تطابق بالایی دارد. ضمن اینکه تطابق بالای نمودار سرعت لحظه‌ای پرتابه بر حسب زمان در این مدل، با نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه شده در [۴] نشان از برتری مدل حاضر نسبت به مدل کوکرون در قسمت شرط توقف فرآیند نفوذ دارد.

19. Anderson, C.E., Johnson, G.R., and Holmquist, T.J, "Ballistic Experiments and Computations of Confined 99.5% Al₂O₃ Ceramic Tiles", The 15th Int. Symp. on Ballistics, Jerusalem, Israel, May 1995.
20. Bogetti, T.A., "Finite Element Modeling of Transverse Impact on a Ballistic Fabric", Int. J. Mech. Sci., Vol. 48, No. 1, pp. 33-43, 2006.
9. Wen, H.M., "Predicting the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Projectiles with Different Nose Shapes", Int. J. Impact Eng., Vol. 49, No. 3, pp. 321-329, 2000.
10. Field, J.E., Sun, Q., and Townsend, D., "Ballistic Impact of Ceramics" Univ. of Cambridge, Department of Physics, UK, Accepted for Pub., 1985.
11. Woodward, R.L., "A Simple One-dimensional Approach to Modeling Ceramic Composite Armor Defeat", Int. J. Impact Eng., Vol. 9, No. 4, pp. 455-474, 1990.
12. Reijer, P.C.D. "Impact on Ceramic Faced Armor", Ph.D. Dissertation, Delft Univ., 1991.
13. Rosenberg, Z. and Dekel, E., "A Critical Examination of the Modified Bernoulli Equation Using Two-dimensional Simulations of Long Rod Penetrators", Int. J. Impact Eng., Vol. 15, No. 5, pp. 711-720, 1994.
14. Cunniff, P.M., "An Analysis of the System Effects in Woven Fabrics under Ballistic Impact" Extile Res. J., Vol. 62, No. 9, pp. 495-509, 1992.
15. Navarro, C., Rodrõguez, J., and Cortes, R., "Analytical Modeling of Composite Panels Subjected to Impact Loading", J. de Physique I, Colloque C8, Supplement au J. de Physique III, No. 4, pp. 515-520, 1994.
16. Roylance, D., Wilde, A., and Tocci, G., "Ballistic Impact of Textile Structures", Extile Res. J., Vol. 43, No. 1, pp. 34-41, 1973.
17. 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", Extile Res. J., Vol. 28, No. 4, pp. 288-302, 1958.
18. Charles, E., Anderson, J.R., Hohler, V., Walker, J.D., and Stilp, A.J. "Time-Resolved Penetration of Long Rods into Steel Targets", Int. J. Impact Eng., Vol. 16, No. 1, pp. 1-18, 1995.