Archive of SID

بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه در یک هدف سرامیک/کامپوزیت

محمد مشتاقيان وخداداد واحدى

دانشکده فنی مهندسی دانشگاه جامع امام حسین(ع) (تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۳ : تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۱۲)

چکیدہ

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, Alekseeviski, 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

۰- دانشجوی کارشناسی ارشد: Mohammadmoshtaghian@gmail.com

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

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 خصوصیاتی 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 بهدلیل 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 درصدد برآمدند که زرههای ترکیبی، بهصورت لایهای از سرامیک در جلو و لایهای از فلز و یا کامپوزیت بهعنوان لایه پشتیبان طراحی کنند که در حالت بهینه، تمامی خصوصیات یک زره کارآمد را دارا باشد.

زرههای سرامیکی که با مواد کامپوزیتی بهعنوان 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، صرفنظر 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/پوکسی بهدلیل خصوصیات مکانیکی مناسب، بیشترین کاربرد را در

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 بهخاطر قابلیت اعتماد بالا مناسبترین روش هستند؛ ولی اطلاعاتی در مورد تاریخچه بارگذاری و تغییرات بهوجود آمده در طی پروسه نفوذ به ارائه نمیدهند و از طرفی بسیار پر هزینه میباشند.

رویکرد دوم که در واقع پروسه نفوذ را با کمک هیدروکدها و روشهای المان محدود، بهصورت عددی شبیهسازی میکند نیز معایبی دارد. از جمله این معایب این که هر دو روش المان محدود و تفاضل محدود به پارامترهای زیادی برای توصيف ماده نياز دارند كه اغلب اين پارامترها مجهول بوده و بهدست آوردن آنها مشکل است. برای نمونه طبق گفته محققین، بهمنظور 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. رویکرد سوم که یک بررسی تئوری و تحلیلی بر روی پدیده نفوذ دارد یک روش ساده و راهی سريع براي دستيابي به نتايج مورد نظر مي باشد كه با استفاده از معادلات انرژی، بقای مومنتوم، قانون دوم نیوتن، معادله برنولی و ... به توصيف رخدادهای فيزيکی در حين یروسه نفوذ می پردازد. در صورت تطابق نتایج مدل تحلیلی با دادههای آزمایشگاهی، میتوان بر اعتبار مدل تحلیلی، صحه گذاشت. برای بررسی پدیده نفوذ به صورت تحلیلی کارهای زیادی توسط محققین انجام گرفته که از آن جمله می توان به مدل تیت'، فلوز'، فلورنس'، خدارحمی، لیاقت، کوکرون و... اشاره کرد[۴–۱]. در صورت دستیابی به برنامههای رایانهای این مدلها، می توان در کمتر از چند دقیقه به نتایج مورد نظر دست یافت. بررسی تحلیلی نفوذ پرتابهها در اهداف مركب سراميك/كامپوزيت نيز توسط محققين انجام گرفته است که میتوان به مدل تحلیلی کوکرون بنلولو که تحلیلی یک بعدی 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 مي توان يافت [٩-8].

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

^{1 -}Tate

²⁻ Fellows

³⁻ Florence

^{4 -}Chocron Benloulo



شکل(۱): توصيف فرآيند در پايان 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 (t) ند نفوذ می کند. پشت پرتابه نیز با سرعت (t) حرکت می کند. بنا بر معادله تیت [۱] میتوان نوشت:

$$Y_{p} + \frac{1}{2}\rho_{p}(V - \dot{x})^{2} = Y_{c} + \frac{1}{2}\rho_{c}\dot{x}^{2}, \ \dot{x} > 0.$$
 (7)

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

$$M_{p}\frac{dV(t)}{dt} = -Y_{p}A_{p}.$$
(°)

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

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

 A_p سطح مقطع است که ثابت فرض شده و $\rho_p \,$ 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 (۴–۲) معادلات حاکم بر فاز اول بوده و برای محاسبه N(t), $M_p \, e(t)$ معادلات را حاکم مدل بوده و برای محاسبه N(t) میادات را حاکم مدل با 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 نفوذ میدهد نیز تغییر داده شده است. این مدل، کل فرآیند نفوذ را در دو فاز مجزا بررسی میکند. در فاز اول، سرامیک بهصورت یک مخروط در حال شکست بوده و هیچ گونه نفوذی در الیاف مشاهده نمیشود. در فاز دوم، مخروط سرامیک شکل گرفته بههمراه 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 بهدست آمده است. در مواردی بهواسطه اصلاحات انجام گرفته، نتایج حاصل از مدل مواردی بهواسطه اصلاحات انجام گرفته، نتایج حاصل از مدل کوکرون، با نتایج حل عددی دارد.

۲- بسط مدل تحلیلی همان طور که گفته شد، این مدل طی دو فاز مطرح است که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

۲–۱ فاز اول

فاز اول، از لحظه برخورد نوک پرتابه به صفحه سرامیکی آغاز شده و تا شکست کامل سرامیک بهصورت مخروطی شکل ادامه دارد. مشاهدات نشان داده است که پس از برخورد پرتابه به سرامیک جلوی زره، ترکهای سطحی بهصورت مخروطی در طول ضخامت سرامیک رشد میکند و در نهایت مخروط در راستای ضخامت سرامیک بهوجود 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[۱۱–۱۰]:

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

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

دنریجر [17] زمان تشکیل مخروط سرامیکی که در واقع زمان انتهای فاز اول و آغاز فاز دوم است را بهصورت t = 6h/c فرض کرد که h ضخامت تایل سرامیک و 2 سرعت صوت در سرامیک است. مقادیر Mp V(t) و (x) در t = 6h/c بهعنوان شرایط اولیه فاز دوم مطرح هستند.

۲-۲- فاز دوم

فاز دوم در b(t) t = 6h/c شروع می شود. 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، (t) x سرعت سطح اثر لحظهای سرامیک و پرتابه و $(t)_0$ سرعت نفوذ مخروط سرامیک به پشتیبان کامپوزیتی است. اختلاف میان V(t) و (t) x نرخ فرسایش پرتابه و همچنین اختلاف بین (t) x و $(t)_0$ نفوذ پرتابه به مخروط سرامیکی را نشان می دهد.



شکل(۲): توصيف فرآيند در فاز دوم.

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

۲-۲-۱- معادلات حاکم بر حرکت پر تابه
در حین برخورد و حرکت پرتابه به هدف سرامیکی دو حالت
ممکن است اتفاق بیفتد:

- حالت اول (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 بهصورت زیر نوشته می شود:

$$Y_{p} + \frac{1}{2}\rho_{p}(V - \dot{x})^{2} = Y_{c}' + \frac{1}{2}\rho_{c}(\dot{x} - \dot{u}_{0})^{2},$$

$$\dot{x} > \dot{u}_{0}, V > \dot{x},$$
 (Δ)

که در آن، Y_c' استحکام دینامیکی سرامیکهای خرد شده است. برای اطلاعات دقیق تر 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 بهصورت معادله (۳) بهدست میآید. البته شرایط اولیه در این فاز، با شرایط انتهای فاز اول برابر است. معادله دیگر از شرایط هندسی و بقاء جرم و پیوستگی پرتابه متابعت میکند که برابر است با:

 $\begin{aligned} \frac{dM_{p}}{dt} &= \rho_{p}A_{p}\dot{I}, \\ \dot{I} &= -(V - \dot{x}), \end{aligned} \tag{8} \\ \frac{dM_{p}}{dt} &= -\rho_{p}A_{p}(V - \dot{x}), \\ \Delta x & \text{cr} \ \ddot{I} & \text{i}, \end{aligned} \tag{9} \\ \Delta x & \text{cr} \ \ddot{I} & \text{i}, \end{aligned} \tag{9}$

$$Mp_2 \frac{dV}{dt} = -Y_c A_c, \qquad (Y)$$

¹⁻ Den Reijer

²⁻ Aleksevskii

متربرثانیه، موج عرضی زمان کافی برای پیشروی قبل از تخریب پانل 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 $G\pi L^2 A$ – بیان شده در معادلات (۸) بهطور کلی صرفنظر کرد. ترم سوم سمت راست در معادله مادله در واقع برای پیدا کردن $(1)_0$ ، در هر لحظه میتوان معادله در واقع برای پیدا کردن $(1)_0$ ، در هر لحظه میتوان استفاده نمود. بدین صورت که حاصل $M_c u_0(t)$ ، برای هر گام زمانی محاسبه و با تقسیم آن بر $(1)_c N_c$ ($1)_0$ ، بدر میآید. $(1)_c M_c$ ($1)_c$.

$$\frac{dM_{c}(t)}{dt} = (\dot{u}_{0} - \dot{x})A_{p}\rho_{c} ,$$

$$\dot{u}_{0} > \dot{x} , M_{c} = 0 , u_{0} = x .$$
(9)

همان طور 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، برهم کنش خواهند داشت که با شبیه سازی می توان، معادله (۸) را به صورت حاصل ضرب مومنتوم در سرعت- که انرژی را می دهد- بین پرتابه و کامپوزیت نوشت:

$$\frac{d(M_{p3}V_3(t))}{dt}u_0 = -2F\cos\theta - G\pi L^2 A + Y_p A_p u_0. \tag{(1)}$$

شرایط اولیه برای معادله جرم و سرعت پرتابه در لحظه شرایط اولیه برای معادله جرم و سرعت پرتابه در لحظه الیاف $(M_c(t)=0)$ 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 (بالاتر از ۱۰ میلیمتر) با توجه به اینکه حجم مخروط سرامیک ایجاد شده زیاد است، تا انتهای فرآیند، جرم مخروط سرامیک سرامیک صفر نخواهد شد و معادله (۱۰) از محاسبات مدل خارج میشود، ولی برای پرتابه کالیبر بسیار کوچک (حدود سرامیک میلیمتر) با توجه به اینکه حجم مخروط سرامیک مفروط شرامیک مفر نخواهد شد و معادله (۱۰) از محاسبات مدل مرامیکی خارج میشود، ولی برای پرتابه کالیبر بسیار کوچک (حدود مرامیکی خارج میشود، ولی برای پرتابه کالیبر بسیار کوچک (حدود میلیمتر) با توجه به اینکه حجم مخروط سرامیکی خارج میشود، ولی برای پرتابه کالیبر باسیار کوچک (حدود مفر شده و معادله (۱۰) وارد محاسبات مدل میشود و ایجای شده (۱۰) وارد محاسبات مدل میشود و تعلین کاهش (۱) ادامه مییابد (شکل ۴). کوکرون و گالوز در تحقیق خود از پرتابههای کالیبر بالا استفاده کردهاند. در تحقیق خود از پرتابههای کالیبر بالا استفاده کردهاند. در تحقیق خود از پرتابهای کالیبر بالا استفاده کردهاند. در تحقیق خود از پرتابهای کالیبر بالا استفاده کردهاند. در تنیم معادلات (۹–۸) تا پایان فرآیند نفوذ معتبر میباشد.

که در این حالت جرم پرتابه ثابت و برابر با جرم انتهای حالت اول است. ۲- ممکن است سرعت مخروط، (*i*, *u* 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 می کند.

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 (*i*₀(t)، در دو طرف، ترمهای انرژی حاصل شده است[۴].

$$\frac{d\left(M_{c}\dot{u}_{0}\right)}{dt}\dot{u}_{0} = -2F\cos\theta - G\pi L^{2}\dot{A} + Y_{c}A_{p}\dot{u}_{0}, \qquad (\Lambda)$$
$$\dot{u}_{0}(t=t_{1}) = 0,$$

که در آن، M_c جرم مخروط سرامیکی، A درصد حجمی لایه لایه شده و L طول مشخصهی پشتیبان است. ترم \dot{A} (معادله (۵) مقدار انرژی اتلافی بهازای واحد زمان را به علت لایه لایه شدن به دست می دهد. G، انرژی مورد نیاز برای لایه لایه کردن یک متر مربع کامپوزیت بر مسب J/m^2 می باشد. این ترم فقط در سرعتهای برخورد پایین دارای اهمیت بوده و برای سرعتهای بالاتر از ۱,۰۰۰

ولی اگر در مدل از پرتابههای کالیبر کوچک استفاده شود، از زمانی به بعد برهم کنش بین پرتابه و کامپوزیت انجام می پذیرد. به عبارت 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'، کانیف'، ناووارو' و رویلنس ٔ ارائه خواهد شد[۲۹–۱۳]. 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 نتایج تحلیلی بهدست آمده با نتایج حل عددی تطابق خوبی را نشان میدهد. موقعی که پرتابه به الیاف الاستیک خطی برخورد میکند، سرعت (t_0) پرتابه و کرنش محوری ε , رابطهای به شکل زیر با هم دارند: $u_0 = c_y \sqrt{2\varepsilon\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)}} - \varepsilon^2$. (11)

سرعت لحظهای ثابت بوده و برای مواردی که سرعت c_y لحظهای پرتابه غیر ثابت باشد نیز معتبر میباشد[۱۷]. پر بزرگی سرعت صوت در الیاف کامپوزیت است. اسمیت زاویه

- 1 -Beaumont
- 2- Cunniff

5- Smith

$$\sin\theta = \frac{\sqrt{2\varepsilon\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon^2}}{\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)}}.$$
(17)

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

$$F = E \varepsilon S n_l n_y. \tag{11}$$

که در آن، B مدول یانگ، S سطح مقطع الیاف، n_i تعداد لایهها و n_y تعداد الیاف است که مستقیماً در تماس با ضربهزن قرار دارد. فرض می شود همه الیاف کرنش یکسان دارند. حال، فرمول تحلیلی نفوذ پرتابه در هدف سرامیک/کامپوزیتی کامل شده و می توان با ارائه مقادیر ورودی، دادههای خروجی را از مدل استخراج کرد. معادلات بالا برای یافتن P مجهول $(t), n_p(t), x(t), u_0(t)$ به طور همزمان به کار می روند.

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:

$$R_i = R_o \left(\frac{M_{pi}}{M_{po}}\right)^{2/3} \frac{n_{yo}}{n_{yi}}.$$
 (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 "o" 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_r زمان تخریب الیاف که در واقع زمان پایان یافتن فرآیند نفوذ و عبور یا توقف پرتابه است به صورت زیر محاسبه میشود[۴]:

$$\int_{0}^{t_{r}} \varepsilon^{2} dt = R. \tag{10}$$

³⁻ Navarro

⁴⁻ Roylance

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 $0 = \frac{du_0}{dt}$ 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 باقیمانده پرتابه(Vres) و سرعت حد بالستیک(Vb) قابل محاسبه خواهد بود. در صورت رخداد بالستیک(b) قابل محاسبه خواهد بود. در می توان عمق نفوذ نهایی را بهعنوان 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 ۲۲ گرمی در سرعت ۱٫۲۵۰ متر بر ثانیه است که به یک هدف سرامیکی (آلومینای ۹۹/۵٪) با پشتیبان کامپوزیتی دینما برخورد می کند. سرعت باقیمانده پرتابه بهوسیله سیستمهای داپلر^۱ اندازه گیری می شود که در آن، فرآیند برخورد در معرض پنج اشعه x مختلف ثبت می شود و امکان اندازه گیری طول باقیمانده پرتابه وجود دارد. در جدول 1 دادههای ورودی برای اجرای مدل تحلیلی منطبق با شرایط مذکور آزمایشگاهی ارائه شده است.

شکلهای (\mathbf{P} – $\mathbf{\Delta}$) مقایسه میان نتایج تحلیلی مدل کوکرون و دادههای آزمایشگاهی انجام گرفته توسط ^TENSB را نشان میدهد. همان طور که مشخص است بین نتایج مدل تحلیلی و دادههای آزمایشگاهی، هم خوانی 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 این و در صورت تطابق نتایج مدل تحلیلی حاضر با نتایج مدل تحلیلی کوکرون میتوان بر اعتبار این نتایج صحه گذاشت.



شکل(۵): مقایسه سرعت باقیمانده بهدست 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].

واحد	مقدار	نماد	داده های ورودی
گرم	۲۷	M _p	جرم اوليه پرتابه
میلیمتر	١٢	D _p	قطر پرتابه
میلیمتر	۳۵/۲	L ₀	طول اوليه پرتابه
متر بر ثانیه	1800	\mathbf{V}_0	سرعت اوليه
کیلوگرم بر متر مکعب	۱۸۱۰۰	ρ	چگالی پرتابه
گیگا پاسکال	٣/٢	Y _p	تنش تسلیم دینامیکی پرتابه
کیلوگرم بر متر مکعب	۳۸۴۰	ρ _c	چگالی سرامیک
متربرثانيه	1	c	سرعت صوت در سرامیک
میلیمتر	۲.	hc	ضخامت سرامیک
گیگا پاسکال	٧/۵	Y _c	تنش تسلیم دینامیکی سرامیک
گیگا پاسکال	٣/٢	Y'c	تنش تسلیم سرامیک خرد شده
گیگا پاسکال	1	Е	مدول الاستيك الياف
سانتىمتر مربع	۲١/۵	S	سطح مقطع الياف
یک بر متر	1800	n _y	تعداد الیاف در یک متر فیبر
-	13.	nl	تعداد لايهها
متر بر ثانیه	1	cy	سرعت صوت در کامپوزیت

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 می شود 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 می شود [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 چشم گیر نباشد. شبیهسازی عددی نمودارهای تاریخچه بارگذاری، جابجاییها و سرعتها را نیز می تواند ارائه دهد. شکل ۹ نمودار سرعت-زمان پرتابه را برای شبیهسازی عددی و مدل تحلیلی کوکرون و مدل تحلیلی پیشرو نشان میدهد.



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 ارزش گذاری مدل تحلیلی حاضر، نتایج بهدست 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 شبیه سازی عددی انجام گرفته در [۴]، با هیدروکد دو بعدی AUTODYN صورت گرفته است.



شکل(۶): مقایسه طول باقیمانده بهدست آمده از مدل تحلیلی کوکرون با دادههای آزمایشگاهی برای پرتابه ۲۰ mm APDS در سرعت ۳/s ۱۲۵۰[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 (۳-۲) 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 بهکار رفته برای پرتابه ۲۱/۷ 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 ۳ ۱۱۴/۳ گرمی است. نمودار نتایج مدل تحلیلی و مقایسه با نتایج مدل تحلیلی کوکرون در شکلهای (۸-۷) آمده است. سرعت باقیمانده

Arch^{A9}*e of SID*

L _r (mm)			V _r (m/s)			ن م	.g J	3	
شبیهسازی عددی[۴]	مدل کوکرون[۴]	مدل حاضر	شبیهسازی عددی[۴]	مدل کوکرون[۴]	مدل حاضر	ىخامت تايل بوزيتى (mm)	ىخامت تايل اميكى(mm)	رعت برخورد	نمونه
14	١٢	۱۵/۰۶	۶۵۰	۲۸۰	844	۲.	۲.	11	١
۱۵	۱۳	14/94	۷۸۰	۷۲۰	۷۱۰	۲.	۲.	170.	٢
14	14	۱۵/۷	٩٨٠	१ঀ٠	٩۶٨	۲.	۲.	14	٣
١٢	٩	11/4	42.	۳۰۰	818	۲.	۲۵	120.	۴
١٧	١٧	١٩	٨٧٠	94.	٩۴٣	۱۵	۱۵	170.	۵

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

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

I	L _r (mm) V _r (m/s)			و. اک	. م	1			
شبیهسازی عددی[۴]	مدل کوکرون[۴]	مدل حاضر	شبیهسازی عددی[۴]	مدل کوکرون[۴]	مدل حاضر	خامت تایل بوزیتی(mm)	خامت تایل امیک ی (mm)	رعت برخورد	نمونه
75	۲۳	۲۵/۹	66 .	۵۲۰	۵۷۷	۲.	۲.	۱۰۰۰	۶
75	۲۵	78	94.	۹۵۰	981	۲.	۲.	120.	٧
۲۵	75	۲۷/۵	177.	1780	1778	۲.	۲.	10	٨
۲۵	۲۵	78	۹۱۰	٩٣٠	۹۲۸	۲۵	۲.	120.	٩
۲۳	۲۱	22/18	٨٩٠	٨۵٠	٨٦٣	۲.	۲۵	120.	١٠
۲۱	۲۱	۲۳	۸۳۰	۸۲۰	۸۱۸	۲۵	۲۵	1200	11





مطابق شکل **۹**، تا زمان (۱۱–۱۱) 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 میکروثانیه بهبعد شروع میشود. در این بازه علیرغم این که میکروثانیه بهبعد شروع میشود. در این بازه علیرغم این که 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 ناشی میشود که مطابق این مدل-که در [۴] بهطور کامل ناشی میشود که مطابق این مدل-که در برخورد مذکور بیان شده است-کامپوزیت در شرایط حاکم در برخورد مذکور در حدود ۲۰ میکروثانیه تخریب میشود:(۲۰ = t). این در حالی است که با فرضیات انجام گرفته در مدل حاضر ۶۰-ماری است که با فرضیات انجام گرفته در مدل حاضر ۶۰-ماری است که با فرضیات انجام گرفته در مدل حاضر ۶۰-

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 می گیرد. پرتابه میلهای بلند انرژی جنبشی به پرتابهای گفته می شود که به سبب 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 مسئله (کوچک بودن قطر و جرم پرتابه و نسبت طول به قطر 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، معادلات (۹–۸) وارد ترخه حل می شود. به عبارت دیگر، حل این مسئله با مدل چرخه حل می شود. به عبارت دیگر، حل این مسئله با مدل 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 میلی متر است.

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

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 ۸۸۴۸/۰ 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

شبیه سازی به کمک نرم افزار LS-DYNA، انجام گرفته است. این نرم افزار، یک حل گر قوی در شبیه سازی مسائل ضربه و نفوذ می باشد که مسائل را بر پایه انتگرال زمانی صریح حل می کند. برای مسئله حاضر، پرتابه و هدف به صورت متقارن محوری مدل شده و برای مش بندی 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 به کار رفته است[۱۹]. ضرایب به کار 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

Archive of SID

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

توصيف	مقدار	پارامتر	واحد
دانسيته	۳۸۰۰	ρ	kg/m^3
مدول برشی	٩٠/١۶	G	GPa
-	٠/٩٣	Α	-
_	۰ /۳ ۱	В	-
_	•	С	-
-	• /8	М	-
=	• /8	Ν	-
نرخ کرنش	١	 E	1/ <i>s</i>
استحكام كششى	• / ٢	$Sf_{\rm max}$	МРа
پارامتر تخريب	•/••۵	D_1	-
"	١	D_2	-
مدول بالک	18./9069	K_1	-
"	0	<i>K</i> ₂	-
"	0	K_{3}	-

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

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.

۵-۱-۵- 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 بهروش مدل تحلیلی ارائه شده در مقاله بهدست آمده است. سایر جزئیات مربوط به مدل تحلیلی و روند شکل گیری 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.



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 بهروش 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.



عددی برای پرتابه فولادی سرعت برخورد ۱٫۵۰۰ متر بر ثانیه.

۲,۰۰۰ **۲–۴ نتایج برخورد گلوله فولادی با سرعت ۲٫۰۰۰** متر بر ثانیه شکل۱۲، تغییرات سرعت گلوله فولادی با سرعت اولیه ۲٫۰۰۰ متر بر ثانیه را در برخورد با هدف سرامیکی با

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

فاز اول

نمودار V-t برای پرتابه فولادی

فاز دوم



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

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

۵-۲- بحث در مورد نتایج حل مسئله

همان طور 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 نمیباشـند. با این حال با توجه به مقادیر انتخاب شده، سرعتهای خروجی و روند تغییرات آنها منطقی به نظر میرسد. مـسئله 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 نمی شود. لذا نتایج تجربی از آن در دسترس نیست. زیرا اولاً پرتابه مورد بحث بسیار سبک میاشد و وزنی در حدود یک گرم دارند. ثانیا قطر آن بسیار کم بوده و نسبت طول به قطر بیش از ۱۰ می باشد. در حالی که در اکثر موارد، پرتابههایی مورد ارزیابی قرار می گیرند 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 مے تواند زره را سوراخ کند یا خیر؟ در جواب باید گفت این مسئله در تمام حالات ذكر شده اتفاق مىافتد كه هم مدل تحليلي 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.

Archive of SID

 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 بهدلیل دقیق نبودن برخی از پارامترها و ثوابت تجربی است که بهعنوان ورودی برای شبیهسازی عددی و مدل تحلیلی نیاز است.

مراجع

 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- خدارحمی، 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.
- Chocron Benloulo, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 كوكرون 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 یایان 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 نمی توان 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 توضيح 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 می گیرد 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 شبیه سازی عددی ارائه شده در [۴] نشان از برتری مدل حاضر نسبت به مدل کوکرون در قسمت شرط توقف فرآیند نفوذ دارد.

- 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.
- 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.
- 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.
- Field, J.E., Sun, Q., and Townsend, D., "Ballistic Impact of Ceramics" Univ. of Cambridge, Department of Physics, UK, Accepted for Pub., 1985.
- Woodward, RL., "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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Roylance, D., Wilde, A., and Tocci, G., "Ballistic Impact of Textile Structures", Extile Res. J., Vol. 43, No. 1, pp. 34-41, 1973.
- 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.
- 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.