



بررسی تجربی، عددی و تحلیلی جذب انرژی در پدیده نفوذ با سرعت بالا روی اهداف کامپوزیتی

حسین تقی پور¹، کرامت ملک‌زاده فرد^{2*}، علی بیگدلی¹

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
* تهران، صندوق پستی 123456789، k.malekzadeh@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/10/28

پذیرش: 96/3/15

کلیدواژگان:

برخورد

نفوذ

هدف کامپوزیتی

مکانیزم جذب انرژی

چکیده

یکی از متداول‌ترین و مناسب‌ترین دیدگاه‌های مربوط به پدیده برخورد و نفوذ گلوله در اهداف کامپوزیتی، مدل‌های مربوط به بحث انرژی می‌باشد. مطالعه حاضر با بررسی مدل‌های گوناگون قبلی، سعی در انجام اصلاحات و کامل نمودن آنان نموده است. این مدل ضربه، با بررسی مکانیزم‌های جذب انرژی و مقایسه آن با انرژی کل گلوله در هنگام برخورد، توانایی یا عدم توانایی خروج گلوله از هدف را بررسی نموده است، و انرژی باقیمانده در هنگام خروج گلوله از هدف را پیش‌بینی می‌کند. در بررسی تجربی مخزنی از جنس شیشه/اپوکسی تحت نفوذ گلوله کروی با سرعت‌های متفاوت برای تصدیق مدل پیشنهادی انجام شده است. در این مدل سهم هر یک از مکانیزم‌های جذب انرژی در سرعت‌های گوناگون تخمین زده شده است. همچنین سرعت بالستیکی گلوله در برخورد با یک هدف کامپوزیتی با دقت مناسبی برآورد شده است. مدل پیش رو نسبت به مدل‌های ارائه شده قبلی بیشترین مکانیزم‌های جذب انرژی را در نظر گرفته است، و سعی نموده است با اضافه کردن مکانیزم‌های جذب انرژی جدید شامل انرژی جذب شده ناشی از تغییر مکان راس مخروط تحت نیروی گلوله، انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک - پلاستیک الیاف اولیه و انرژی جذب شده ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی، بهترین و دقیق‌ترین مدل جذب انرژی را بیان نماید. در نهایت نتایج این مدل با نتایج تحلیل المان محدود انجام گرفته با نرم‌افزار انسیس ماژول ال‌اس‌داینما مقایسه شده است.

Experimental, numerical and analytical study of energy absorption in high velocity penetration phenomena on composite targets

Hossein Taghipoor¹, Keramat Malekzade Fard^{2*}, Ali Bigdeli¹

1-Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2-Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

**P.O.B 123456789 Tehran, Iran, k.malekzadeh@mut.ac.ir

Keywords

Impact
Penetration
Composite Target
Projectile

Abstract

One of the most important, most accurate and the best of views to projectile impact and penetration phenomena in the composite target is the models related to energy discussion. In this paper previous works have been studied and it has been tried to verify and complete them. In the experimental study for the accuracy of model a reservoir of glass/epoxy is done under projectile impact and penetration of spherical pellets at different speeds. This model can investigate the ability or inability of projectile exit from the target and predict the remaining energy during passing through the target, by comparison the total energy of projectile with energy absorption mechanism. Also it is estimated the contribution of each mechanism to absorb energy at different speeds by this model. As well as ballistic velocity of projectile is estimated when it impacts to a composite target with good accuracy. This model has considered the most mechanism of energy absorption and it has been tried to add new mechanism of energy absorption; includes energy absorbed from the shift of the top cone under the projectile, energy absorbed by deformation of elastic - plastic primary fiber and energy absorbed from the friction make between the projectile and composite targets; and expresses the best and most accurate model of energy absorption. Finally, the results of this model have been compared with the results of FEM performed by ANSYS module LS.DYNA.

1- مقدمه

چه در داخل پوسته استوانه‌ای فلزی یا کامپوزیتی وجود دارد. هر یک از این مدل‌ها برای ارائه روشی دقیق در راستای بررسی پدیده نفوذ ویژگی‌های دقیق پاسخ مواد هدف، با توجه به محدوده تنش‌هایی که یک شیء در هنگام نفوذ با

دیدگاه‌های مختلفی برای بررسی سرعت خروجی و توصیف پدیده نفوذ چه در داخل صفحه اعم از صفحات کامپوزیتی، فلزی، سرامیکی و دیگر موارد مشابه و

Please cite this article using:

Taghipoor, H. Malekzade Fard, K. and Bigdeli, A., "Experimental, numerical and analytical study of energy absorption in high velocity penetration phenomena on composite targets", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 12-24, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

دادند. همچنین لیاقت و همکاران [14] در مقاله‌ای دیگر به بررسی عددی و تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های ساخته شده به روش پیچش الیاف پرداختند و مکانیزم‌های مختلف آسیب را بررسی کردند.

مدل تحلیلی نشان داده شده در مطالعه پیش رو بر اساس انتقال انرژی بین گلوله و هدف می‌باشد، که علاوه بر مکانیزم‌های جذب انرژی ذکر شده سه مکانیزم جذب انرژی جدید شامل انرژی اصطکاک در طول برخورد E_{Fr} ، انرژی جذب شده ناشی از تغییر مکان راس مخروط تحت نیروی گلوله E_{Dis} و انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک - پلاستیک الیاف اولیه E_{EP} را اضافه نموده است. این روش نیازمند خواص مکانیکی و گسیختگی (شکست) و هندسه هدف و مشخصات گلوله به عنوان ورودی می‌باشد.

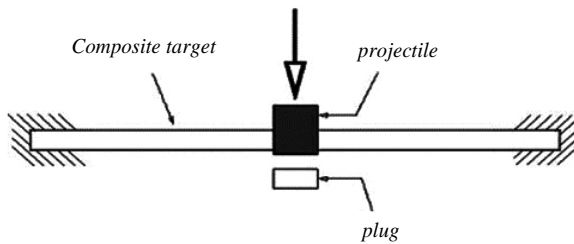


Fig. 1 Schematic of creation holes [4]

شکل 1 شکل شماتیک تشکیل سوراخ [4]

فرضیاتی که در مطالعه حاضر در نظر گرفته شده‌اند به صورت زیر می‌باشد:

- حرکت گلوله در خلال نفوذ در طول هر فاصله زمانی یکنواخت می‌باشد.
 - الیاف / رشته‌ها در هر لایه به صورت مستقل عمل می‌کند.
 - انرژی جذب شده ناشی از الیاف / رشته‌های اولیه و تغییر شکل الیاف ثانویه به صورت مستقل عمل می‌کنند. یا به عبارتی دیگر رفتار انرژی جذب شده ناشی از شکست الیاف اولیه و تغییر شکل الیاف ثانویه به طور مستقل می‌باشد.
 - سرعت امواج طولی و عرضی در تمام لایه‌ها یکسان می‌باشد.
 - گلوله در خلال رویداد برخورد بالستیک با هدف در تماس می‌باشد.
 - جابه‌جایی گلوله و ارتفاع مخروط تشکیل شده در هر فاصله زمانی یکسان می‌باشد.
 - مکانیزم شکست کامپوزیت کاهش ضخامت است (این فرض بوسیله تصویر برداری سریع تایید شده است).
 - سرعت‌های گلوله و مخروط در هر فاصله زمانی یکسان، برابر می‌باشند.
 - گلوله در طول برخورد صلب است و بدون تغییر شکل باقی می‌ماند (این فرض بوسیله آزمایش تایید شده و نشان داده شده، که شکل گلوله پس از برخورد تغییر نمی‌کند)
- با توجه به نوع هدف کامپوزیتی (الیاف و زمینه مورد استفاده در هدف) که مورد اصابت قرار گرفته، ممکن است تمامی مکانیزم‌های موجود یا برخی از این مکانیزم‌ها موثر باشد. به عبارت دیگر برای هر نوع هدف کامپوزیتی چند مکانیزم جذب انرژی مهم‌تر است. (برای مواد گوناگون، شبیه کربن، شیشه یا کولار مکانیزم‌های گوناگون می‌تواند حکم فرما باشد). همچنین، تقویت ساختار بر مکانیزم‌های جذب انرژی موثر است.

آن مواجه می‌شود و با توجه به تنوع الگوهای شکست و تغییر شکلی که اتفاق می‌افتد، که بسیار پیچیده می‌باشند، می‌بایست مورد بحث و بررسی قرار گیرد. در طی ضربه، گلوله ممکن است هدف را سوراخ کند یا نفوذ کند و یا ممکن است کمانه کند. با بررسی این مدل‌ها که توسط افراد گوناگون ارائه شده است، می‌توان فهمید که روش انرژی یکی از بهترین روش‌ها برای توصیف پدیده نفوذ می‌باشد. این روش توسط افرادی مثل مورای¹ و هاین² [1] و نیک³ و شرارو⁴ [4-2] بسط و بررسی شده است.

برخورد گلوله بخاطر پخش موج عرضی باعث ایجاد یک مخروط در پشت کامپوزیت می‌شود [4-2]. اثر ضربه بر روی الیاف اولیه در کامپوزیت، یعنی الیافی که مستقیماً با گلوله برخورد دارند و الیاف ثانویه که در اثر شکل‌گیری مخروط تغییر شکل می‌یابند، مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. مطالعات تجربی توسط ژو⁵ بر روی لایه‌های بافته شده کولار - پلی‌استر با تغییر ضخامت نشان می‌دهد که مخروط بر روی صفحه پشتی کامپوزیت در خلال رویداد ضربه بالستیک شکل می‌گیرد [5].

نیک و شرارو نیز در چندین مقاله به بحث و بررسی درباره روش انرژی و مکانیزم‌های جذب انرژی پرداخته‌اند [4-2]. با مطالعه فرضیات آنها می‌توان دریافت که با مدل مورای و هاین شباهت‌های زیادی دارد. برای فهم کامل حد بالستیک کامپوزیت‌ها، آسیب‌های گوناگون و مکانیزم‌های جذب انرژی باید به روشنی بررسی شوند. مکانیزم‌های جذب انرژی اشاره شده در مدل‌های قبلی بدین صورت می‌باشد: انرژی جنبشی مخروط متحرک E_{KE} ، برش سوراخ E_{Sp} ، تغییر شکل الیاف ثانویه E_{ED} ، کشش گسیختگی الیاف ثانویه E_{TF} ، لایه‌لایه شدگی E_{DI} ، ترک خوردگی زمینه E_{Mc} و دیگر مکانیزم‌های اتلاف انرژی. شیک و نیروی یک مدل تحلیلی با استفاده از مکانیزم‌های جذب انرژی مورد اشاره در خلال ضربه بالستیک دو بعدی در اهداف کامپوزیتی ارائه نمودند. این مدل‌ها در کنار مدل‌های ارائه شده توسط ویلکینز⁶ [6]، ون⁷ [7] و واکرا⁸ [8] از دقت خوبی برخوردارند و قابل بسط و گسترش می‌باشند.

پل و همکاران [9] به صورت تجربی خواص بالستیک نانو ذرات رسی در کامپوزیت‌های شیشه/اپکسی را بررسی کرده و میزان جذب انرژی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کردند. شیخ و همکاران [10] رفتار پنل‌های کامپوزیتی چند لایه را به صورت تجربی و عددی تحت برخورد بالستیک مورد بررسی قرار دادند. لی⁹ و سان¹⁰ و الیس¹¹ گزارش کرده‌اند برش سوراخ یکی از مدهای عمده آسیب در برخورد گرافیت بیسمال¹² چند زاویه‌ای بوسیله گلوله سر تخت (پهن) می‌باشد. شکل 1، طرح کلی ترتیب شکل‌گیری سوراخ در خلال برخورد بالستیک را نشان می‌دهد. ذات شکننده کربن که اساس کامپوزیت است مسئول تغییر مکانیزم آسیب می‌باشد. تشکیل سوراخ برشی برای کامپوزیت‌های تقویت شده با شیشه که کرنش گسیختگی بالایی در نرخ‌های بالای کرنش دارد مشاهده نشده است [11, 12].

لیاقت و همکاران [13] رفتار بالستیک استوانه‌های کامپوزیتی ساخته شده با روش پیچش الیاف و وجود ریب‌های مجزا را مورد تحلیل و آزمایش قرار

¹-Morye

² Hine

³ Naik

⁴ Shrirao

⁵ Zhu

⁶ Wilkins

⁷ Wen

⁸ Walker

⁹ Lee

¹⁰ Sun

¹¹ Ellis

¹² Ply graphite/bismaleimide

2- تئوری مکانیزم های جذب انرژی

مکانیزم‌هایی را که برای جذب انرژی در نظر گرفته شده است عبارتند از: گسیختگی الیاف اولیه و تغییر شکل الاستیک ثانویه، علاوه بر دو مکانیزم مطرح شده که تقریباً در تمامی مدل‌های جذب انرژی مطرح شده‌اند، مکانیزم های جذب دیگری هم وجود دارد که شامل انرژی جذب شده بر اثر تشکیل سوراخ برشی، انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی تحت برخورد بالستیکی، انرژی جذب شده ناشی از لایه‌لایه‌شدگی، انرژی جذب شده ناشی از ترک خوردن زمینه و انرژی جذب شده ناشی از برش سوراخ است، و همچنین مکانیزم‌های جدید جذب انرژی که در این مدل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، شامل انرژی جنبشی حرکت صفحه کامپوزیت، انرژی ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی، انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک - پلاستیک الیاف اولیه و انرژی جذب شده بر اثر جابه‌جایی راس مخروط می‌باشد. قسمتی از صفحه کامپوزیتی که قبل از برخورد در حال سکون است، بعد از برخورد بوسیله گلوله به حرکت در می‌آید و بنابراین موجب اختلاف انرژی بین انرژی جنبشی و حرکت مخروط می‌شود. مجموع انرژی جذب شده در این مدل را می‌توان به صورت رابطه (1) نشان داد.

$$E_{total} = E_{TF} + E_{ED} + E_{KE} + E_{EP} + E_{FR} + E_{Dis} + E_{Di} + E_{Mc} + E_{Sp} \quad (1)$$

2-1- انرژی جذب شده در شکست کششی الیاف اولیه

الیاف اولیه نیروی مقاومی را در برابر نفوذ گلوله در هدف تولید می‌کنند.

شکست این الیاف موجب جذب مقداری انرژی می‌گردد.

اگر انرژی جذب شده در نقطه شکست کششی کامپوزیت در واحد حجم E_c باشد آنگاه کل انرژی جذب شده بوسیله شکست کششی E_{TF} کامپوزیت به وسیله معادله (2) داده می‌شود.

$$E_{TF} = E_c V \quad (2)$$

که V حجم کرنش کامپوزیت برای شکست کششی است. از آنجایی که قاعده مخروط تشکیل شده به صورت بیضی‌گون می‌باشد، که این مطلب در شکل 2 دیده می‌شود، این حجم با رابطه (3) برابر است.

$$V = 2R_{cmax} \cdot D \cdot T + 2R_{cmin} \cdot D \cdot T \quad (3)$$

با جانشینی رابطه (3) در معادله (2) از آن بدست می‌آید.

$$E_{TF} = E_c \cdot (2R_{cmax} \cdot D \cdot T + 2R_{cmin} \cdot D \cdot T) \quad (4)$$

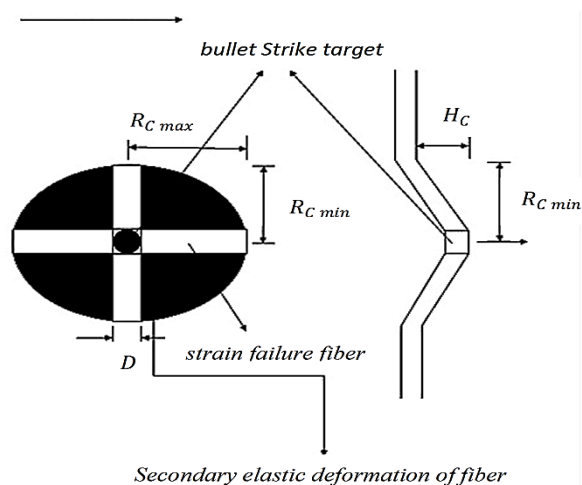


Fig. 2 Bullet penetration on target

شکل 2 شکل شماتیک نفوذ گلوله در هدف

2-2- انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه

الیاف ثانویه، کرنش‌های متفاوتی، وابسته به موقعیتشان تحمل می‌کنند. الیافی که نزدیک نقطه برخورد می‌باشند، کرنشی برابر با کرنش دورترین نقطه الیاف اولیه را تحمل می‌کنند، در حالی که الیافی که دور از نقطه برخورد هستند کرنش کمتری را تحمل می‌کنند. انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک کامپوزیت در یک کرنش ϵ ، می‌تواند نقاط زیر منحنی خطی تنش-کرنش باشد، یعنی:

$$E_{ED} = \frac{1}{2} M \epsilon^2 \quad (5)$$

بطور تجربی الیاف در منطقه تغییر شکل یافته، که مستقیماً با گلوله در تماس نیستند، بسته به موقعیت آنها، کرنش‌های متفاوتی خواهند داشت. نقاطی که نزدیکتر به نقطه برخورد هستند، بطور تجربی تنها مقدار کمی تا کرنش شکست فاصله دارند، در حالی که نقاطی که در فاصله دور از نقطه برخورد هستند هیچ کرنشی در آنها دیده نمی‌شود. این شرایط باعث ایجاد شرایط مرزی براساس تغییر در کرنش ϵ با فاصله از نقطه برخورد می‌شود، که در $r = \frac{D}{2}$ برابر $\epsilon = \epsilon_0$ و در $r = R_{cmin}, R_{cmax}$ برابر $\epsilon = 0$ می‌شود. که ϵ_0 کرنش شکست کامپوزیت است.

بر اساس رابطه بیضی:

$$\frac{x^2}{R_{cmax}^2} + \frac{y^2}{R_{cmin}^2} = 1 \quad (6)$$

همچنین:

$$x = R_c \cos(\theta) \quad (7)$$

$$y = R_c \sin(\theta) \quad (8)$$

در نتیجه

$$R_c = \frac{R_{cmax} R_{cmin}}{\sqrt{R_{cmax}^2 \sin^2(\theta) + R_{cmin}^2 \cos^2(\theta)}} \quad (9)$$

این تغییرشکل (ϵ) در شکل 3 نشان داده شده و آنرا می‌توان با رابطه (10) بیان کرد.

$$\epsilon = \frac{2(R_c - r)}{(2R_c - D)} \quad (10)$$

با توجه به اینکه شکل قاعده مخروط بیضی‌گون می‌باشد و با جایگذاری رابطه بیضی دچار پیچیدگی و طولانی شدن رابطه‌ها می‌شود، در نتیجه با بدست آوردن میانگین هندسی شعاع‌های بزرگ و کوچک بیضی‌گون، می‌توان با یک دقت مناسب به حل مسئله مورد نیاز دست پیدا کرد.

$$R_{cm} = \sqrt{R_{cmax} R_{cmin}} \quad (11)$$

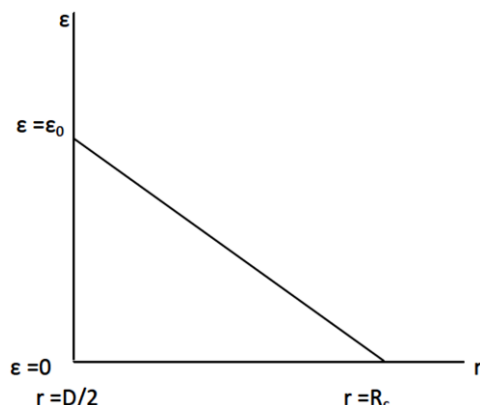


Fig. 3 Strain diagram based on the distance of the radius of the bullet

شکل 3 نمودار کرنش بر حسب فاصله از شعاع گلوله

2-5- انرژی جذب شده ناشی از برش سوراخ (E_{sp})

با برخورد گلوله به هدف استحکام برشی ماده کامپوزیتی هدف از سوراخ شدن آن ممانعت می‌کند، در نتیجه می‌بایست مقداری از انرژی گلوله صرف غلبه بر استحکام برشی هدف گردد. این انرژی پس از فائق آمدن بر استحکام برشی موجب سوراخ شدن هدف می‌شود. تشکیل سوراخ برشی برای کامپوزیت‌های تقویت شده با شیشه که کرنش گسیختگی بالایی در نرخ‌های بالای کرنش دارد مشاهده نشده است، ولی در کامپوزیت‌های تقویت شده با کربن، ذات شکننده کربن که اساس کامپوزیت است مسئول تغییر مکانیزم آسیب می‌باشد. بسته به نوع ماده کامپوزیتی هدف و مواد اولیه تشکیل دهنده آن، می‌توان به خصوصیات هدف پی برد، و با توجه به این که هدف ذات شکننده دارد یا خیر می‌توان درک کرد که آیا می‌توان از این مکانیزم صرف نظر کرد و یا آن را در جذب انرژی کل سهم دانست.

$$E_{sp} = NT_l S_{sp} P D T \quad (19)$$

در ادامه بررسی مکانیزم‌های جذب انرژی، به سه مکانیزم جذبی پرداخته می‌شود که جدید می‌باشند و در مطالعات قبلی در نظر گرفته نشده‌اند.

2-6- انرژی ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی (E_{fr})

برای بدست آوردن انرژی ناشی از اصطکاک ابتدا باید نیروی وارد بر هدف کامپوزیتی در خلال پدیده نفوذ را بدست آورد. برای این کار می‌بایست نیروی ناشی از برخورد گلوله بر هدف کامپوزیتی را محاسبه کرد. از آنجائیکه برخورد گلوله به صورت مایل می‌باشد پس می‌بایست نیروی وارده از طرف گلوله بر هدف کامپوزیتی را در دو راستای عمودی و مماسی، تجزیه نمود. در عبارت زیر F_{pn} نیروی وارده در راستای عمودی توسط گلوله به هدف می‌باشد. می‌توان با استفاده از روابط ساده موجود برای ضربه نوشت.

$$F_{pn} V t = m_p V v_n \quad (20)$$

شتاب گلوله هنگام حرکت در هدف با شتاب ثابت کاهشدهنده صورت می‌گیرد، که از رابطه (21) بدست می‌آید.

$$a_p = constant \rightarrow v_n^2 - v_{n0}^2 = 2a_p T \quad (21)$$

$$v_n - v_{n0} = a_p V t \rightarrow V t = \frac{v_n - v_{n0}}{a_p} \quad (22)$$

با بدست آوردن Δt از محاسبات بالا و جایگذاری در فرمول‌های قبلی می‌توان F_{pn} را محاسبه نمود و از محاسبه آن انرژی هدر رفته ناشی از اصطکاک را محاسبه نمود.

$$E_{fr} = F_{pn} \mu T \quad (23)$$

که در رابطه (23)، μ ضریب اصطکاک بین گلوله و هدف کامپوزیتی است که تقریباً برابر 0.15 است.

2-7- انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک- پلاستیک الیاف اولیه (E_{ep})

اگر انرژی کل الیاف اولیه قبل از شروع به تسلیم را به دو قسمت تقسیم کنیم، قسمتی از انرژی جذب شده توسط این الیاف صرف تغییر شکل الاستیک (کشسان)، و قسمتی از انرژی جذب شده توسط این الیاف صرف تغییر شکل پلاستیک آن می‌گردد. که در واقع این قسمت از انرژی جذب شده توسط الیاف کار غیر قابل بازگشت انجام می‌دهد. این مقدار از انرژی به دلیل اینکه در کامپوزیت‌های مورد مطالعه مواد زمینه شکننده است و به تبع آن خود ماده کامپوزیتی نیز شکننده است، قابل صرف نظر می‌باشد. مقداری از انرژی نیز صرف گسست الیاف می‌شود که در قسمت‌های قبل مورد مطالعه قرار گرفت. بنابراین در این قسمت می‌بایست ابتدا انرژی الاستیک جذب شده توسط الیاف اولیه را بدست آورد، و همانطور که اشاره شد می‌توان از انرژی تغییر شکل

کل انرژی جذب شده در گسیختگی الیاف ثانویه را می‌توان با استفاده از انتگرال رابطه (12) بدست آورد.

$$E_{ED} = T \int \frac{1}{2} M 2\pi r dr 4\epsilon_0^2 \left(\frac{R_{cm} - r}{2R_{cm} - D} \right)^2 \quad (12)$$

در نتیجه بدست می‌آید.

$$E_{ED} = \frac{\pi M \epsilon_0^2 T}{(2R_{cm} - D)} \left[\frac{R_{cm}^4}{3} - \frac{D^2 R_{cm}^2}{2} + \frac{D^3 R_{cm}}{3} - \frac{D^4}{16} \right] \quad (13)$$

2-3- انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی تحت برخورد بالستیکی (E_{KE})

هنگامی که یک گلوله به هدفی برخورد می‌کند، قسمتی از هدف به شکل مخروطی در می‌آید و با سرعتی مشخص شروع به حرکت می‌کند، در تمام مدل‌های موجود این شکل مخروطی مانند، تایید شده است. در آزمایشات تجربی نیز دوربین‌های سرعت بالا وجود این مخروط را در پشت هدف اثبات می‌کند [1]. سرعت حرکت این مخروط را می‌توان برابر با سرعت گلوله در هر لحظه فرض نمود.

انرژی جنبشی حرکت مخروط با استفاده از رابطه (14) بدست می‌آید.

$$E_{KE} = \frac{1}{2} m_c V_c^2 \quad (14)$$

که m_c جرم مخروط متحرک و V_c سرعت مخروط متحرک است. جرم مخروط در فرآیند نفوذ از رابطه (15) بدست می‌آید.

$$m_c = \pi R_c \max R_c \min T \rho \quad (15)$$

راه انتخاب شده برای بدست آوردن V_c یک فرضیه ساده کننده است که می‌گوید سرعت مانده گلوله یک حد بالایی برای سرعت مخروط است. بعلاوه تصویر برداری سرعت بالا خود توجیهی برای این فرض است. پیشنهاد می‌شود سرعت در رابطه (14) شبیه سرعت گلوله در هنگام خروج فرض شود و برای همه پیش بینی‌ها سرعت حرکت مخروط برابر با سرعت مانده گلوله فرض شده است.

2-4- انرژی جذب شده ناشی از لایه لایه شدگی و ترک خوردن زمینه (E_{DI})

بخشی از سطح مخروط لایه‌لایه (پوسته پوسته) شدگی و ترک خوردن زمینه را تحمل می‌کند. بعد از ضربه بالستیکی زمینه هنوز به الیاف چسبیده و به طور کامل از تقویت کننده جدا نشده است، به سبب ترک خوردن ماتریس مقاومت لایه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد در نتیجه بار بیشتر و تغییر شکل بیشتر به لایه‌لایه شدگی می‌انجامد. این احتمال که لایه لایه شدگی در همه لایه‌های سطوح مشترک اتفاق بیافتد وجود ندارد. هر چه به سمت سرعت حد بالستیکی پیش روی شود، لایه‌های کمی که پوسته‌پوسته نشده‌اند باقی می‌مانند و نسبت به لایه‌های پوسته‌پوسته شده خم می‌گردند. در نتیجه لایه‌لایه شدگی و ترک خوردگی زمینه، که در ناحیه مخروطی تحمل می‌شوند، به شکل شبه نواری است که A_{ql} مقدار از مساحت دایره مترادف را می‌گیرند.

$$S = \pi R_c \max R_c \min A_{ql} \quad (16)$$

انرژی جذب شده ناشی از لایه لایه شدگی از رابطه (17) بدست می‌آید.

$$E_{DI} = P_a \pi (R_c \max R_c \min) A_{ql} G_{Icd} \quad (17)$$

که در عبارت (17) و (18)، A_{ql} درصدی از مساحت دایره مترادف که لایه‌لایه شدگی در آن اتفاق می‌افتد، P_a درصد لایه‌لایه شدگی G_{Icd} نرخ افزایش انرژی کرنشی دینامیکی بحرانی در مود II می‌باشد. انرژی جذب شده ناشی از ترک خوردگی زمینه از رابطه (18) بدست می‌آید.

$$E_{Mc} = P_m \pi (R_c \max R_c \min) A_{ql} E_{mt} T \quad (18)$$

P_m درصد ترک خوردگی زمینه، T ضخامت هدف کامپوزیتی و E_{mt} انرژی جذب شده توسط زمینه در واحد حجم می‌باشد.

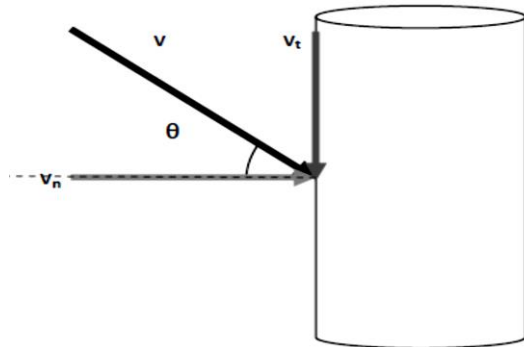


Fig. 5 Cross clash a bullet with a speed v in a cylindrical tank

شکل 5 شکل شماتیک برخورد مایل گلوله با سرعت v به مخزن استوانه‌ای

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \rightarrow I = \frac{1}{12}DT^3 \quad (32)$$

همچنین در تیرهای شکل 4 بیشترین خیز تیر برابر است با (اگر تیر را دو سر گیردار فرض شود):

$$w = \frac{pl^3}{192EI} \quad (33)$$

که در رابطه (31)، P نیروی وارده بر تیر، I طول تیر که در اینجا برابر R_{cmin}، R_{cmax} است و E مدول یانگ می‌باشد. این دو تیر دارای خیز برابر می‌باشند. یعنی:

$$W_{total} = W_1 = W_2 \quad (34)$$

$$w_1 = \frac{8P_1R_c^3max}{192EI}, w_2 = \frac{8P_2R_c^3min}{192EI} \quad (35)$$

که در رابطه (35)، P₁ و P₂ به ترتیب نیروی وارد بر تیر معادل قطر بزرگتر و کوچکتر بیضی‌گون می‌باشد. در نتیجه

$$P_1 + P_2 = P \rightarrow P_1 + P_1 \frac{R_c^3max}{R_c^3min} = P \quad (36)$$

در رابطه (36) منظور از P همان نیروی عمودی وارده از طریق گلوله به هدف می‌باشد که در قسمت قبل بدست آمده است و همان F_{pn} می‌باشد.

$$P_1 = \frac{PR_c^3min}{R_c^3max + R_c^3min} \quad (37)$$

$$P_2 = \frac{PR_c^3max}{R_c^3max + R_c^3min} \quad (38)$$

در لحظه تسلیم رابطه (39) برقرار است.

$$E_e = \frac{1}{2} \frac{\sigma_u^2}{E} \quad (39)$$

که در عبارت (39)، σ_U تنش خمشی تسلیم تیر معادل قطر بیضی‌گون می‌باشد. البته از آنجایی که هر دو تیر از یک جنس هستند و کامپوزیت ایزوتروپیک هست، می‌توان از رابطه (31) استفاده نمود. همین‌طور از معادلات قبلی می‌توان نوشت.

$$\sigma_{b1} = \frac{P_1R_cmaxT/2}{\frac{1}{12}DT^3} = \frac{6P_1R_cmax}{DT^2} \quad (40)$$

$$\sigma_{b2} = \frac{P_2R_cminT/2}{\frac{1}{12}DT^3} = \frac{6P_2R_cmin}{DT^2} \quad (41)$$

با توجه به این که انرژی ناشی از تنش از رابطه (39) بدست می‌آید.

$$E_e = \frac{1}{2} \sigma_b \epsilon_b = \frac{1}{2} \frac{\sigma_b^2}{E} \quad (42)$$

بنابراین بدست می‌آید.

$$E_e = \frac{1}{2} \sigma_{b1} \epsilon_{b1} + \frac{1}{2} \sigma_{b2} \epsilon_{b2} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{b1}^2}{E} + \frac{1}{2} \frac{\sigma_{b2}^2}{E} \quad (43)$$

یعنی:

پلاستیک الیاف اولیه، صرف نظر کرد.

$$E_{EP} = E_{EL} + E_{Pl} \quad (24)$$

از آنجایی که تغییر شکل پلاستیک الیاف اولیه انرژی زیادی را در کامپوزیت‌ها جذب نمی‌کند (به علت اینکه کامپوزیت‌های مورد مطالعه شکننده هستند و تغییر شکل پلاستیک در آنها ناچیز می‌باشد). بنابراین:

$$E_{Pl} = 0$$

در نتیجه:

$$E_{EP} = E_{EL} \quad (25)$$

اگر انرژی جذب شده الاستیک توسط الیاف اولیه در واحد حجم E_e باشد، آنگاه کل انرژی جذب شده به وسیله تغییر شکل الاستیک کششی الیاف اولیه کامپوزیت E_{EL}، بوسیله معادله (26) داده می‌شود.

$$E_{EL} = E_e V \quad (26)$$

که V حجم کرنش کامپوزیت برای تغییر شکل الاستیک کششی است، که از رابطه (3) بدست می‌آید. بنابراین:

$$E_{EL} = 2E_e R_c max DT + 2E_e R_c min DT \quad (27)$$

اما برای بدست آوردن E_e روشی تحلیلی انتخاب شده است، به این صورت که دو نوار نشان داده شده در شکل شماتیک 4 همان الیاف اولیه هستند که دچار گسیختگی می‌شوند و به صورت دو تیر دو سر گیردار در نظر گرفته شده‌اند. در واقع به دلیل اینکه هدف این مطالعه بدست آوردن انرژی جذب شده تا نقطه گسیختگی کامپوزیت می‌باشد، می‌توان چنین فرضی را در نظر گرفت.

اگر سرعت برخورد گلوله با هدف را v، و زاویه برخورد θ، فرض شود می‌توان سرعت را به دو مؤلفه عمودی و مماسی تجزیه نمود، که در شکل 5 نیز نشان داده شده است. در اینجا v_t مؤلفه مماسی و v_n مؤلفه عمودی می‌باشد.

$$v_n = v \cos(\theta) \quad (28)$$

$$v_t = v \sin(\theta)$$

نیروی وارد به هدف که از رابطه (23) بدست آمد، به دو مؤلفه عمودی (F_{pn}) و مؤلفه مماسی (F_{pt}) قابل تجزیه می‌باشد. یعنی:

$$F_{pn} = F_p \cos(\theta) \quad (29)$$

$$F_{pt} = F_p \sin(\theta) \quad (30)$$

تیر شکل 4 دارای پهنای D و ضخامت T می‌باشد. در این تیر؛

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} \quad (31)$$

که I از رابطه (32) بدست می‌آید.

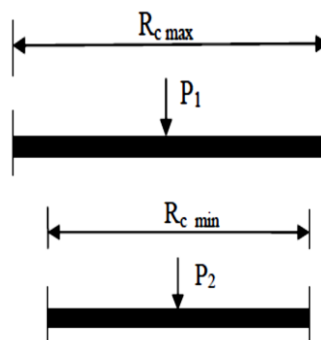


Fig. 4 Approximate the beam on the target component

شکل 4 شکل تقریبی تیرها بر روی هدف کامپوزیتی

حرکت می‌کند تا الیاف آغشته شده به رزین در یک زاویه معین روی مندرل خوابانده شود. انواع گوناگون ماشین‌های رشته پیچی در بازار موجود است، که در رنج‌های دو تا شش محوره هستند. [13] مشخصات مخزن مورد آزمایش در جدول 1 آمده است.

گلوله‌های برخورد کننده به این هدف به شکل گوی بوده (ساقمه) و به قطر 7.5 میلی‌متر و با تفنگ با کالیبر 7.62 میلی‌متر شلیک گردیده است، که در شکل 9 نشان داده شده است.

در اولین تست برای شلیک گلوله اول از یک گرم باروت سیاه کلاس چهار به عنوان خرج استفاده گردیده است. وزن این گلوله برابر 1.75g می‌باشد. سرعت برخورد گلوله در این حالت برابر 328m/s است. در این حالت گلوله از هدف عبور نمی‌کند و هیچ اثری نیز از گلوله پشت سیل مشاهد نمی‌گردد است.

در تست دوم برای شلیک گلوله دوم از یک و نیم گرم باروت سیاه کلاس چهار به عنوان خرج استفاده گردیده است. وزن این گلوله برابر 1.73g می‌باشد. سرعت برخورد گلوله در این حالت برابر 540m/s است. در این حالت همانطور که در شکل 13 مشاهده می‌شود گلوله از هدف عبور نمی‌کند و پشت هدف تا حدودی متورم شده است، همچنین تغییر رنگ در پشت هدف مشاهده می‌شود. در تست سوم برای شلیک گلوله سوم از دو گرم باروت سیاه کلاس چهار به عنوان خرج استفاده گردیده است. وزن این گلوله برابر 1.75g می‌باشد. سرعت برخورد گلوله در این حالت برابر 946m/s است. در این حالت گلوله از هدف عبور می‌کند و روی سیل فولادی اثر آن مشاهده می‌شود. شکل گلوله‌ها و همچنین چگونگی جاسازی آنها در پوکه و گاز بند شدن آنها در شکل‌های 8 و 7 نمایش داده شده است.



Fig. 6 Tank tested

شکل 6 تصویری از مخزن مورد آزمایش قرار گرفته جدول 1 مشخصات مخزن مورد استفاده

Table.1 Reservoir characterization tests

توضیحات	مشخصات	جزئیات ضروری
		مخزن
	اپوکسی (Epoxy)	رزین
	E-Glass tex2400	الیاف
	±45,90, ±45, ±45,90, ±45,90, ±45,90	آرایش
	80 (bar)	فشار کاری

$$E_e = \frac{1}{2E} \left(\frac{6R_{cmax}}{DT^2} \right)^2 \frac{F_{pn}}{\left[1 + \left(\frac{R_{cmax}}{R_{cmin}} \right)^3 \right]^2} + \frac{1}{2E} \left(\frac{6R_{cmin}}{DT^2} \right)^2 \frac{F_{pn} \left[\left(\frac{R_{cmax}}{R_{cmin}} \right)^3 \right]^2}{\left[1 + \left(\frac{R_{cmax}}{R_{cmin}} \right)^3 \right]^2} \quad (44)$$

با ساده کردن رابطه (44) بدست می‌آید.

$$E_e = \frac{18F_{pn} \cdot R_{cmin}^2 R_{cmax}^2 (R_{cmin}^4 + R_{cmax}^4)}{ED^2 T^4 \cdot (R_{cmin}^3 + R_{cmax}^3)} \quad (45)$$

با جایگذاری رابطه (45) در رابطه (26) می‌توان به رابطه (46) رسید.

$$E_{El} = E_e (2R_{cmax}DT + 2R_{cmin}DT) \quad (46)$$

8-2- انرژی جذب شده ناشی از تغییر مکان راس مخروط ناشی از نیروی گلوله (E_{Dis})

بر اثر برخورد گلوله به هدف کامپوزیتی نیرویی به هدف وارد می‌گردد، که این نیرو در قسمت 2-6 محاسبه گردیده است. این نیرو سبب یک جابجایی در هدف می‌گردد که این تغییر مکان در واقع همان تغییر مکان راس مخروط می‌باشد. بنابراین:

$$E_{Dis} = F_{pn} \delta \quad (47)$$

که در رابطه (47) F_{pn} نیروی عمودی ناشی از برخورد گلوله بر هدف کامپوزیتی و δ تغییر مکان راس مخروط تشکیل شده پشت هدف ناشی از نیروی مذکور می‌باشد.

از بررسی مکانیزم‌های جذب انرژی می‌توان سرعت خروج گلوله از هدف (v_s) و همچنین سرعت حد بالستیکی (v_0) را پیش‌بینی کرد.

$$E_l = \frac{1}{2} m_p v_0^2 \quad (48)$$

$$E_l = \frac{1}{2} m (v_s^2 - v_f^2) \quad (49)$$

از قانون بقای کار و انرژی می‌توان به عبارت (49) رسید (البته قابل ذکر است که کار اصطکاک یا به عبارتی دیگر گرمای ناشی از اصطکاک غیر قابل بازگشت می‌باشد).

$$E_{Total} = E_{TF} + E_{ED} + E_{KE} + E_{EP} + E_{Fr} + E_{Dis} + E_{Dl} + E_{Mc} + E_{Sp} \quad (50)$$

بنابراین با مدل ارائه شده در این مطالعه می‌توان سرعت حد بالستیکی را برای این برخورد (که ممکن است قائم یا مایل باشد) بدست آورد.

برای بدست آوردن R_{cm} می‌توان از روابط تحلیلی نیز استفاده نمود، به این صورت که ابتدا مدول برشی ماده مورد نظر توسط تست‌های آزمایشگاهی بدست آورده می‌شود. کشش سنج ویدیویی اندازه کرنش برشی در نمونه را با جایجایی 2 نقطه مشخص روی فک نشان می‌دهد. میدان دید کرنش سنج بوسیله ورنیه کولیس کالیبره شده است. نیروی خروجی دستگاه بوسیله کامپیوتر برای کشیدن منحنی نیرو جابجایی ثبت می‌شود. [15]

3- آزمایش‌های تجربی

در انجام این مطالعه سعی شده است تا از نتایج تست‌های تجربی نیز استفاده گردد. مخزن ساخته شده از جنس شیشه/اپوکسی می‌باشد و روش ساخت مخزن که در شکل 6 نشان داده شده است، به روش رشته پیچی است [14]، به منظور ساختن یک سازه رشته پیچی، یک مندرل در ماشین رشته پیچی قرار می‌گیرد. یک ماشین رشته پیچی شبیه یک ماشین تراشکاری است که از استوک‌های سر و ته برخوردار است، که مندرل روی آنها بسته می‌شود، و ابزار برش (که در اینجا به جای ابزار برش حلقه‌ای به قطر دلخواه برای ایجاد یک باند الیاف و پیچش آن روی مندرل وجود دارد) توسط واحد کنترل کننده جابه‌جا می‌شود. مندرل می‌چرخد و واحد کنترل کننده نسبت به مندرل

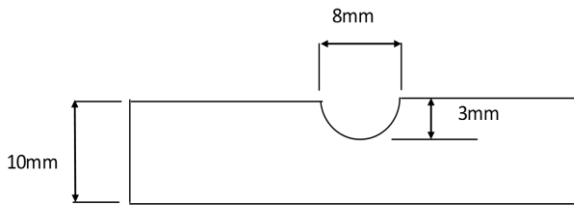


Fig. 11 Targets diagram of the composite goal after hitting the third shot (third test) and bullet impact on its output target

شکل 11 شکل شماتیک از سیل پشت هدف کامپوزیتی پس از برخورد گلوله سوم (تست سوم) و اثر گلوله خروجی از هدف بر روی آن



Fig.12 Targets composite image of the back of the goal after hitting the third shot (third test) and bullet impact on its output target

شکل 12 تصویر از سیل پشت هدف کامپوزیتی پس از برخورد گلوله سوم (تست سوم) و اثر گلوله خروجی از هدف بر روی آن



Fig.13 Composite image of a bullet to its target in second test

شکل 13 تصویری از هدف کامپوزیتی پس از برخورد گلوله به آن در تست دوم

از مشاهده اثر گلوله بر روی هدف کامپوزیتی در تست شماره دو با توجه به عدم خروج گلوله از هدف می‌توان نتیجه گرفت که یک مخروط در پشت هدف کامپوزیتی شکل گرفته است. این امر در راستای صحت فرضیات انجام گرفته در ارائه مدل پیشنهادی می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد این مخروط دمایی بالایی دارد که این دما باعث تغییر رنگ در روی سیل فولادی پشت هدف گردیده است.

تصویر پس از برخورد گلوله‌ها به هدف کامپوزیتی از جلو و پشت آن در شکل‌های 14 و 15 نشان داده شده است.



Fig. 7 Picture bullets before insertion into the shell casing

شکل 7 تصویر گلوله قبل از جاگذاری در پوکه فشنگ



Fig.8 How to embed the bullet casings and seal

شکل 8 چگونگی جاسازی گلوله در پوکه و گاز بند شدن فشنگ



Fig. 9 Pictures shot by a gun that takes it

شکل 9 تصویر اسلحه‌ای که شلیک گلوله توسط آن صورت می‌گیرد

سرعت خروجی گلوله از دهانه اسلحه با سرعت برخورد به هدف تفاوت چندانی ندارد و مقدار آن با استفاده از سرعت سنج‌ها برآورد شده است. سرعت خروجی گلوله از هدف را باید بر اساس مدل‌های موجود در برخورد گلوله با هدف فلزی (سیل پشت هدف) و اثر گلوله بر روی سیل فلزی پشت هدف تخمین زد. همانطور که از شکل 10 مشخص است، هدف کامپوزیتی در داخل قاب مخصوص قرار گرفته و پشت آن یک سیل فولادی گذاشته شده است. اثر گلوله خروجی از هدف بر روی سیل فلزی پشت آن در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شده است.



Fig.10 The purpose and objective front picture speedometer

شکل 10 تصویر هدف و سرعت سنج‌های جلو هدف

همچنین شکل گلوله‌ها پس از برخورد و گلوله باقیمانده در هدف نشان از اثبات فرض صلب بودن گلوله می‌باشد و صحنه‌گذاری بر فرض صورت گرفته در مدل پیشنهادی است. اندازه این سوراخ‌های تشکیل شده در مقایسه با سکه 250 ریالی در شکل 16 نشان داده شده است.

برای تخمین سرعت حد بالستیکی این برخوردها می‌بایست همان‌طور که در مدل پیشنهادی اشاره شد رفتار شود، یعنی در یکی از ساده‌ترین روش‌های موجود لازم است از رابطه بین سرعت برخورد (V_s) و سرعت باقیمانده گلوله بعد از نفوذ (V_R) در چندین حالت مختلف استفاده گردد. ولی با توجه به مدل پیشنهادی تنها با یک برخورد که به سوراخ شدن هدف منجر شود می‌توان سرعت حد بالستیکی را پیش‌بینی کرد.

4- مدل عددی

گلوله‌ای با مشخصات نمونه مورد آزمایش به هدفی از جنس شیشه اپوکسی مورد اصابت واقع شده است که مشخصات این هدف در مرجع [16] آورده شده، و نتایج مدل مورد مطالعه با داده‌های تحلیلی المان محدود مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که در جدول 2 مشاهده می‌شود.

جهت این نوع مدل سازی از نرم افزار ال‌اس‌داینبا استفاده از MAT22 یا MAT54 استفاده می‌گردد. این دو نوع مدل مادی، جهت شبیه سازی مواد کامپوزیتی می‌باشد. و برای مدل کردن گلوله با توجه به مقاله مورای و دیگران که گلوله را جهت برخورد با کامپوزیت بصورت الاستیک در نظر گرفته و پس از آزمایش هیچ تغییر شکل پلاستیکی در گلوله‌ها مشاهده نکردند بنا بر این جهت مدل‌سازی گلوله از MAT_ELASTIC استفاده می‌گردد.

گلوله کروی با قطر 7.52mm می‌باشد. که با سرعت‌های متفاوت و بصورت عمودی به مرکز استوانه اصابت می‌کند. گلوله از نوع فولاد بوده و با توجه به نوع برخورد و بدون تغییر پلاستیک، گلوله الاستیک در نظر گرفته شده، و خواص الاستیک برای آن وارد شده است. تعداد نودها و المان‌ها جهت استوانه کامپوزیتی به ترتیب 3854 و 3772 می‌باشد و در گلوله نیز تعداد نودها و المان‌ها به ترتیب 675 و 504 المان می‌باشد. نوع برخورد از نوع سطح به سطح است.

همانگونه که در شکل 17 مشاهده می‌شود در نزدیکی محل برخورد گلوله از خط‌های اضافی، جهت مش‌ریزی بهینه مخزن، در نزدیکی محل برخورد استفاده شده است. همچنین در نزدیکی محل برخورد گلوله با استوانه سعی شده است با توجه به ابعاد بسیار کوچک گلوله نسبت به استوانه، مش‌ها تا حد امکان ریز در نظر گرفته شوند تا جواب‌ها به واقعیت نزدیک تر باشد.

5- نتایج و بحث

با مقایسه سرعت‌های بدست آمده از تحلیل المان محدود و مدل پیشنهادی که در شکل 18 و جدول 3 اشاره شده است، می‌توان دریافت که این مدل برای دامنه سرعت 600m/s جواب مناسبی دارد و خطای مدل در سرعت برخورد مذکور برای مخازن با قطرهای مختلف 0.22، 0.256 و 0.303 متر به ترتیب برابر 2.18٪، 9.43٪، 14.46٪ و 9.62٪ می‌باشد که خطای قابل قبولی می‌باشد.



Fig.14 Close-up of the front of a bullet to its target composite

شکل 14 تصویری نزدیک از جلو هدف کامپوزیتی پس از برخورد گلوله به آن



Fig.15 Close-up of the composite after bullet hits its target

شکل 15 تصویری نزدیک از پشت هدف کامپوزیتی پس از برخورد گلوله به آن

همانطور که از تصویر پشت هدف که در شکل 15 نشان داده شده، مشخص است تغییر رنگ به وجود آمده در پشت هدف که در اثر برخوردهای دوم و سوم پدید آمده و گسترش یافته ناشی از لایه‌لایه شدگی هدف کامپوزیتی می‌باشد.

نمایی از هدف پس از برخورد که توسط اشعه ایکس تصویربرداری شده، در شکل 16 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 16 دیده می‌شود، اثر سه سوراخ بر روی هدف نمایانگر شکل سوراخ‌هایی است که بیضی شکل می‌باشد و به دایره بسیار نزدیک است، در نتیجه فرض صورت گرفته در مدل پیشنهادی را تایید می‌کند.

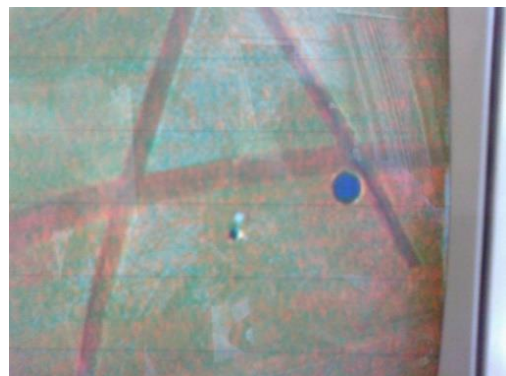


Fig.16 View of the goal after hitting the X-ray imaging

شکل 16 نمایی از هدف پس از برخورد که توسط اشعه ایکس تصویربرداری شده است

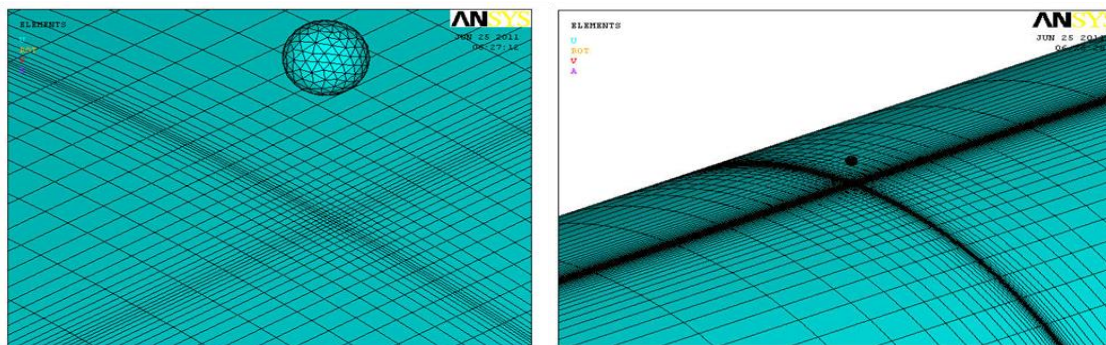


Fig. 17 Tanks and bullets modeling based on standard dimensions

شکل 17 مخزن و گلوله مدل سازی شده بر اساس ابعاد استاندارد از نمای نزدیک

جدول 2 خصوصیات فیزیکی مورد نیاز هدف بعد از برخورد

Table 2 Physical properties required target after collision

Pm	Pd	$G\Pi cd$	$(\%) \varepsilon$	مدول کششی $E (Gpa)$	$\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma} (MPa)$ استحکام کششی، (در مخازن تحت فشار)	E_{mt} انرژی جذب شده توسط زمینه در واحد حجم (MJ/m^3)
درصد ترک خوردگی زمینه	درصد لایه لایه شدگی	نرخ افزایش انرژی کرنشی دینامیکی بحرانی در مود Π (J/m^2)				
%80	%80	1000	0.0667	270	1800	0.9

جدول 3 مقایسه سرعت خروجی از مخازن کامپوزیتی با قطرهای مختلف در خلال برخورد بالستیکی

Table 3 Compare the speed output of composite tanks with different diameters during ballistic impact

سرعت خروجی گلوله از مخازن (m/s)	سرعت اولیه برخورد گلوله با مخزن (m/s)	ضخامت هدف (mm)	قطر گلوله (mm)	زاویه برخورد	قطر مخزن (m)
پیش بینی مدل	تحلیل المان محدود				
441.70	432.27	3.5	5.56	90	0.1152
478.31	449.83	3.5	5.56	90	0.22
346.89	445.18	3.5	5.56	90	0.256
407.94	451.37	3.5	5.56	90	0.303

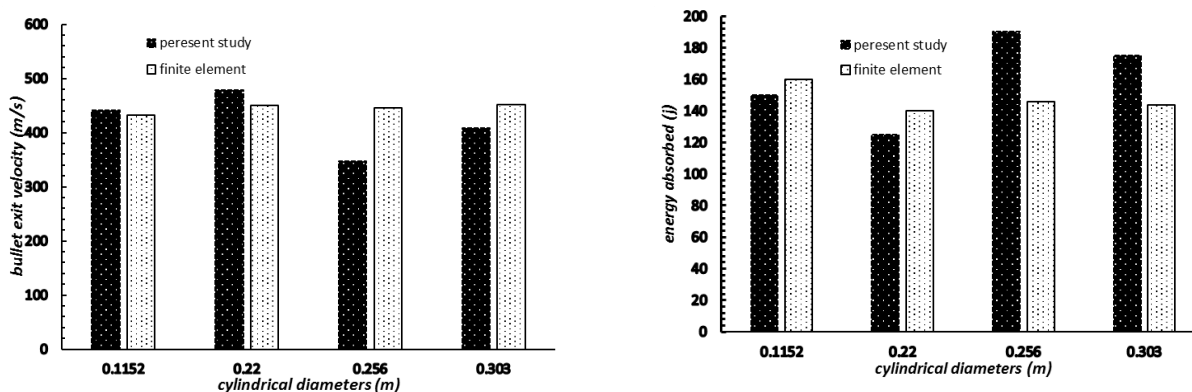


Fig. 18 Compare the amount of energy absorbed during ballistic impact and bullet exit velocity values obtained from finite element analysis model with velocity 600 m/s on goals cylindrical glass / epoxy composite with a thickness of 5.3 mm and Different diameters.

شکل 18 مقایسه مقادیر جذب انرژی در خلال برخورد بالستیکی و مقادیر سرعت خروجی گلوله بدست آمده از مدل پیشنهادی و تحلیل المان محدود با سرعت برخورد 600m/s بر روی اهداف استوانه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ضخامت 3/5 میلی‌متر و قطرهای مختلف

شکل 19 نشان می‌دهد در برخورد با سرعت بالا، با افزایش قطر هدف از 220mm تا 256mm مکانیزم غالب در جذب، انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی (E_{KE}) است، که با افزایش 19.66 درصدی از 37 به 94 ژول افزایش می‌یابد.

در جدول 5 مقایسه پارامترهای مهم بدست آمده توسط مدل پیشنهادی در خلال برخورد بالستیکی گلوله به مخازن کامپوزیتی با قطر 0.303mm و

شکل 19 سهم جذب انرژی توسط هر مکانیزم را برای قطرهای متفاوت سیلندر هدف، نمایش می‌دهد. همانطور که از نتایج مشخص است هدف با قطر 256mm، با جذب انرژی 194.5J، بالاترین میزان جذب انرژی را داشته، و سرعت خروجی گلوله از هدف در این حالت 346.89m/s است، که در قیاس با هدف با قطرهای دیگر، به کمترین مقدار خود رسیده است. نتایج

بیشترین میزان جذب انرژی را دارند، به ترتیب، انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی (E_{KE}) با 48.23 درصد، انرژی ناشی از تغییر مکان راس مخروط ناشی از نیروی گلوله (E_{Dis}) با 41.13 درصد و انرژی ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف (E_{Fr}) با 9.76 درصد می‌باشد، و از سایر مکانیزم‌ها می‌توان صرف‌نظر کرد. این در حالیست که در سرعت‌های برخورد پایین، 45m/s، بیشترین جذب انرژی را به ترتیب در مکانیزم‌های ترک خوردن زمینه (E_{Mc}) با 51.71 درصد، اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی (E_{Fr}) با 22.29 درصد و انرژی جذب شده به وسیله تغییر شکل الیاف ثانویه (E_{ED}) با 9.28 درصد، شاهد هستیم.

سرعت‌های برخورد مختلف آورده شده است. با مقایسه سرعت‌های بدست آمده از تحلیل المان محدود و مدل پیشنهادی که در شکل 20 و جدول 4 اشاره شده است، می‌توان دریافت که این مدل برای مخزنی به قطر 0.22m جواب مناسبی دارد و خطای مدل در پیش‌بینی سرعت خروجی گلوله در برخورد به مخزن مذکور با سرعت‌های مختلف 300، 400، 450، 600m/s در مقایسه با تحلیل المان محدود به ترتیب برابر 11.20٪، 7.67٪، 21.95٪، 1.21٪ و 10.63٪ می‌باشد که خطای قابل قبولی می‌باشد. در شکل 21 می‌توان سهم هر مکانیزم از فرایند جذب انرژی را در سرعت‌های متفاوت مشاهده کرد. این نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های برخورد بالا، مثلاً سرعت برخورد 600m/s، مکانیزم‌هایی که

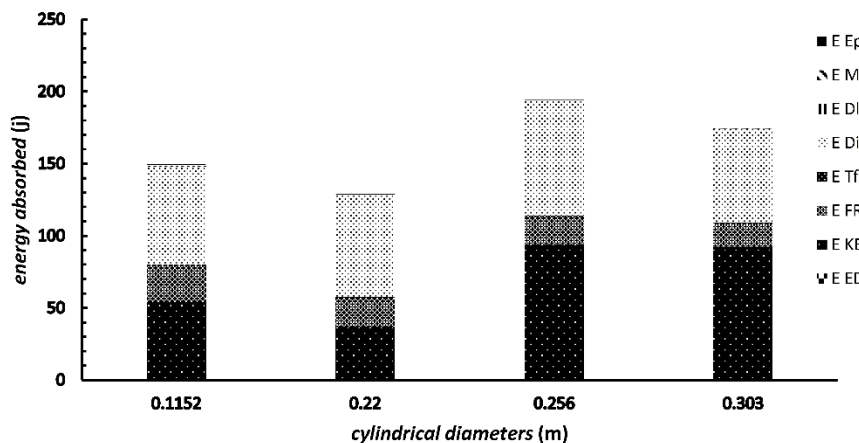


Fig. 19 Comparison of the various mechanisms of energy absorption during a collision model ballistic velocity 600 m/s on the target layer glass / epoxy composite with a thickness of 5.3 mm and Different diameters.

شکل 19 مقایسه مقادیر مکانیزم‌های گوناگون جذب انرژی مدل پیشنهادی در خلال برخورد بالستیکی با سرعت برخورد 600m/s بر روی هدف استوانه کامپوزیتی شیشه‌اپوکسی با ضخامت 3/5 میلی‌متر و قطرهای مختلف.

جدول 4 مقایسه سرعت خروجی از مخازن کامپوزیتی با قطر 0.303mm با سرعت‌های برخورد مختلف در خلال برخورد بالستیکی

Table 4 Compare the speed output of composite tanks with a diameter of 0.303 mm with different impact speeds during ballistic impact.

جرم مخروط (m_c) (g)	قطر گلوله (D) (mm)	ضخامت هدف (T) (mm)	جرم گلوله (m_p) (g)	شعاع کوچک $R_{c(min)}$ (m)	شعاع بزرگ $R_{c(max)}$ (m)	سرعت نهایی برخورد (m/s)		سرعت اولیه برخورد (m/s)
						تحلیل المان محدود	پیش‌بینی مدل	
0.42864	5.56	3.5	0.702	0.003675	0.005054	343.98	382.51	600
0.56252	5.56	3.5	0.702	0.004080	0.005973	258.13	238.33	450
0.54374	5.56	3.5	0.702	0.004509	0.005225	234.16	180.36	400
0.45624	5.56	3.5	0.702	0.004217	0.004987	165.12	167.12	300
0.35487	5.56	3.5	0.702	0.003769	0.00408	119.13	131.99	250

جدول 5 مقایسه پارامترهای مهم بدست آمده توسط مدل پیشنهادی در خلال برخورد بالستیکی گلوله به مخازن کامپوزیتی با قطر 0.303mm با سرعت‌های برخورد مختلف

Table 5 Compare the parameters provided by the model during a collision ballistic composite tanks with a diameter of 0.303 mm bullet to deal with different speeds.

سرعت اولیه برخورد (m/s)	سرعت نهایی برخورد (m/s)	تحلیل المان محدود	پیش‌بینی مدل	زمان عبور گلوله (μs)	شتاب گلوله (m/s^2)	جابه جایی	
						ارتفاع مخروط (mm)	نیروی اعمالی از گلوله به هدف (N)
600	343.98	343.98	382.51	7.41541	-34525394.2	4.542	24235.02306
450	258.13	258.13	238.33	9.88519	-19409843.3	5.495	13624.69598
400	234.16	234.16	180.36	1.10304	-14994021.1	6.834	10525.01951
300	165.12	165.12	167.12	15.0499	-8962197.94	5.741	6250.994751
250	119.13	119.13	131.99	18.9543	-6895017.7	6.558	4839.942214

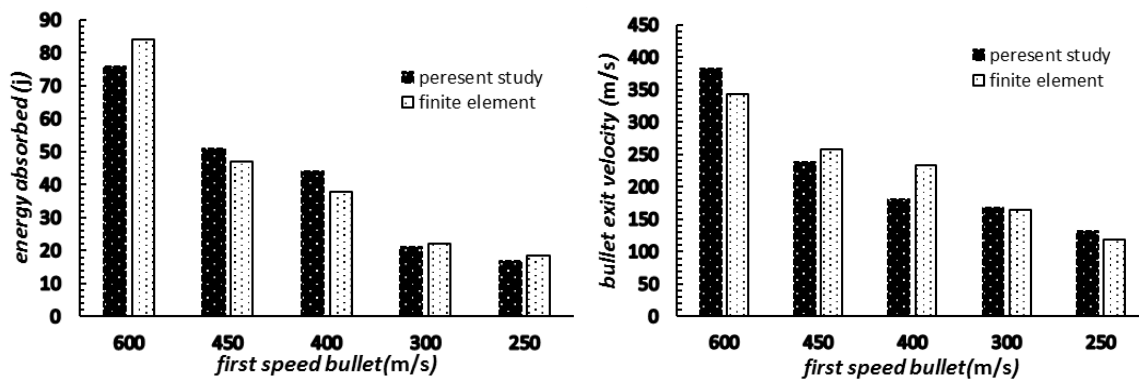


Fig. 20 Compare the amount of energy absorbed during ballistic impact and bullet exit velocity values obtained from finite element analysis model and deal with different speeds on the target layer glass / epoxy composite with a thickness of 5.3 mm.

شکل 20 مقایسه مقادیر جذب انرژی در خلال برخورد بالستیکی و مقادیر سرعت خروجی گلوله بدست آمده از مدل پیشنهادی و تحلیل المان محدود با سرعت‌های برخورد گوناگون بر روی هدف استوانه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ضخامت 3/5 میلی‌متر.

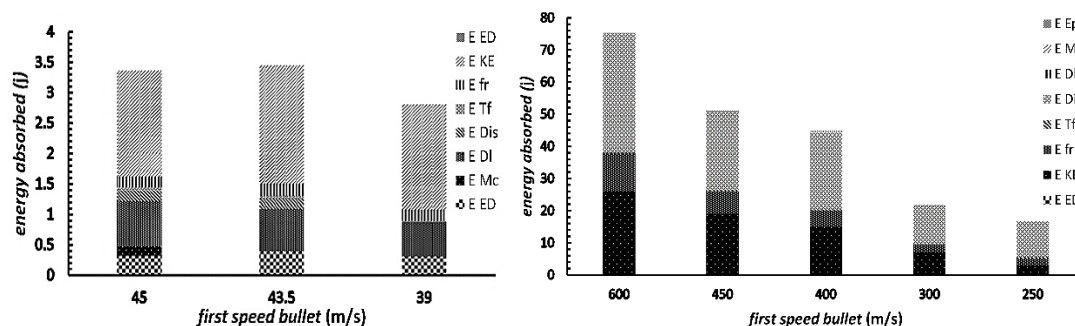


Fig. 21 Comparison of the various mechanisms of energy absorption during a collision ballistic model to deal with different speeds on the target layer glass / epoxy composite with a thickness of 3.5 mm.

شکل 21 مقایسه مقادیر مکانیزم‌های گوناگون جذب انرژی مدل پیشنهادی در خلال برخورد بالستیکی با سرعت‌های برخورد مختلف بر روی هدف استوانه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ضخامت 3/5 میلی‌متر.

نسبت به سرعت برخورد اولیه، از هدف خارج می‌گردد. با دقت در نمودار سرعت باقیمانده در برابر سرعت رویداد برخورد بالستیک می‌توان پی برد، هنگامی که سرعت رویداد برخورد بالستیکی بالاتر از حد بالستیکی افزایش می‌یابد، به طور مشابه سرعت باقیمانده گلوله نیز افزایش می‌یابد. اما این افزایش خیلی شب تندی از حد بالستیکی فوق‌الذکر دارد. برای مثال اگر فرض شود که عمل سوراخ کردن با سرعت رویداد برخورد بالستیکی 158m/s رخ نمی‌دهد اما با سرعت رویداد برخورد بالستیکی 159 m/s، ایجاد سوراخ کامل با سرعت باقیمانده 54m/s رخ می‌دهد [1].

این امر نظر به جابه‌جایی گلوله و افزایش شعاع سطحی مخروط، در خلال رویداد برخورد بالستیکی می‌تواند توضیح داده شود. در سرعت رویداد برخورد بالستیکی معین، لایه‌های بالایی گسسته خواهد شد، در حالیکه ممکن است لایه‌های پایینی گسسته نشوند. کرنش در لایه‌های پایینی در ابتدا افزایش می‌یابد و سپس شروع به کاهش می‌کند. این کار به هندسه مخروط تشکیل شده، که با جابه‌جایی گلوله، تغییر در ارتفاع مخروط و شعاع سطحی مخروط که در هر زمان معین می‌شود، بستگی دارد. در ایجاد سوراخ کامل، اگر کرنش تحمل شده از کرنش مجاز، قبل از اینکه شروع به کاهش نماید تجاوز کند، هندسه مخروط تشکیل شده، و در نتیجه، کرنش تحمل شده با جابه‌جایی گلوله، یعنی تغییر در ارتفاع مخروط (Z_i) و شعاع سطحی مخروط (r_{ii}) در هر زمان معین می‌شود.

در جدول 6 نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی پیشنهادی، آزمایشات تجربی و تحلیل المان محدود با یکدیگر مقایسه شده است. و درصد خطای نسبی نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و تست‌های تجربی در جدول ارائه گردیده است.

5-1- استمرار تماس (مدت زمان انجام برخورد یا مدت ادامه تماس)

مدت ادامه تماس را می‌توان به دو صورت تعریف کرد.

- نفوذ جزئی: فاصله زمانی، از هنگامی که گلوله به هدف ضربه می‌زند، شروع می‌شود و تا هنگامی که سرعت گلوله صفر شود ادامه می‌یابد.
- سوراخ کردن کامل: فاصله زمانی، از هنگامی که گلوله به هدف ضربه می‌زند شروع می‌شود، و تا هنگامی که گلوله از صفحه پشتی هدف خارج شود ادامه می‌یابد.

در حد بالستیکی، گلوله با سرعت صفر از هدف خارج خواهد شد. از شکل 22، به نظر می‌رسد هنگامی که سرعت واقعه برخورد بالستیکی افزایش یابد، مدت ادامه تماس کاهش می‌یابد. باید به این نکته توجه داشت که در حد بالستیکی فوق‌الذکر، مدت ادامه تماس به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش سرعت از 200m/s تا 600m/s، استمرار تماس در فرایند نفوذ، 66.46 درصد کاهش می‌یابد.

5-2- سرعت باقیمانده

سرعت باقیمانده (V_R) گلوله به صورت تابعی از سرعت رویداد برخورد بالستیکی در شکل 23 نشان داده شده است. این نمودار برای موردی با ضخامت هدف $h=3.5$ mm، جرم گلوله $m=0.702$ g، قطر گلوله $d=5.56$ mm می‌باشد. نتایج برای سرعت خروجی گلوله از هدف، در سرعت برخورد 200m/s کاهش 21.41 درصدی را نشان می‌دهد، در صورتی که در حالت برخورد با سرعت 600m/s، سرعت خروج گلوله با 28.56 درصد کاهش

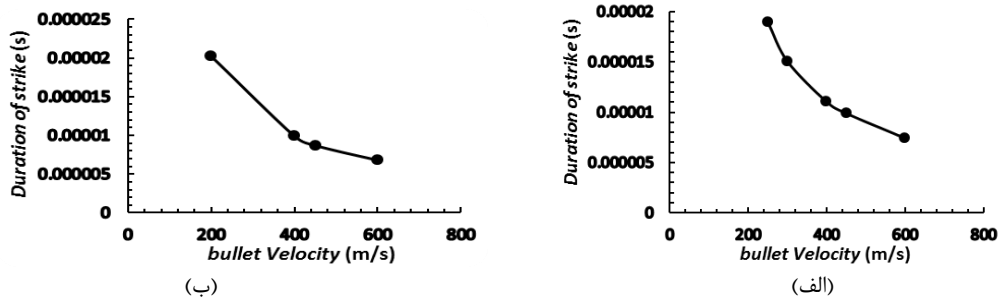


Fig. 22 Comparison of call duration (the time of collision or long call) shot from the proposed model dealing with different speeds on the target layer glass / epoxy composite with a thickness of 5.3 mm in diameter A) 0.22 m B) 0.1152 m

شکل 22 مقایسه مقادیر استمرار تماس (مدت زمان انجام برخورد یا مدت ادامه تماس) گلوله بدست آمده از مدل پیشنهادی با سرعت‌های برخورد گوناگون بر روی هدف استوانه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ضخامت 3/5 میلی‌متر و قطر الف) 0.22 m ب) 0.1152 m

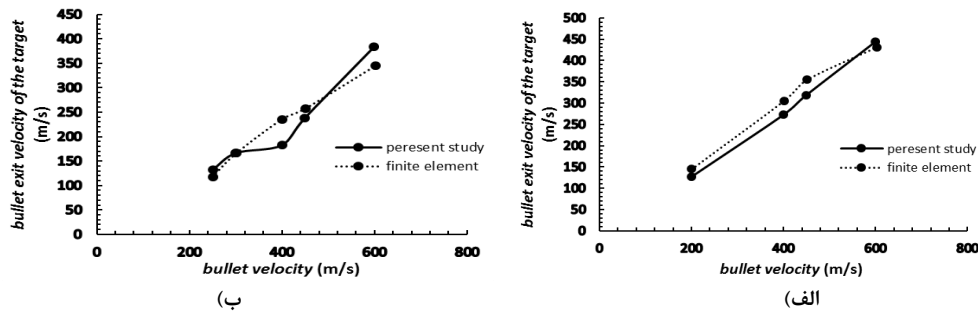


Fig. 23 Compare the linear velocity bullet output obtained from finite element analysis model and deal with different speeds on the target layer glass / epoxy composite with a thickness of 5.3 mm diameter A) 0.22 m B) 0.1152 m

شکل 23 مقایسه خطی مقادیر سرعت خروجی گلوله بدست آمده از مدل پیشنهادی و تحلیل المان محدود با سرعت‌های برخورد گوناگون بر روی هدف استوانه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ضخامت 3/5 میلی‌متر و قطر الف) 0.22 m ب) 0.1152 m

جدول 6 نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی پیشنهادی، آزمایشات تجربی و تحلیل المان محدود با یکدیگر مقایسه شده است. و درصد خطای نسبی نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و تست‌های تجربی

Table 6 The results of the model proposed analysis, finite element analysis experiments are compared with each other

درصد خطای نسبی	آنالیز صورت گرفته با المان محدود		تست‌های تجربی		مدل تحلیلی پیشنهاد شده		پارامترهای اساسی برخورد
	خروج	برخورد	خروج	برخورد	خروج	برخورد	
10.57%	80	950	*	946	185.07	946	سرعت
-	عبور نمی‌کند	550	عبور نمی‌کند	540	عبور نمی‌کند	540	(m/s)
-	عبور نمی‌کند	328	عبور نمی‌کند	328	عبور نمی‌کند	328	

* سرعت خروجی توسط اثر گلوله بر سیل فولادی بدست می‌آید

موجود داشته باشد. همچنین مقاله‌ای ارائه شده، زاویه برخورد را به صورت کلی و پارامتری θ در نظر گرفته است و برای تمامی زوایا قابل استفاده است. همچنین با بررسی مجموع انرژی‌های حاصل از مکانیزم‌های مورد مطالعه در این مدل و مقایسه آن با داده‌های المان محدود که آنالیز آن با نرم افزار انسیس، ماژول ال-اس-داینا صورت گرفته می‌توان به تطابق خوب آنها پی برد. خطای مدل موجود در این مقایسه حدود 10٪ تا 20٪ می‌باشد که برای محاسبات مهندسی مناسب است. مدل ارائه شده به وسیله تست تجربی صحت‌سنجی شده و سرعت اولیه لازم برای عبور گلوله از مخزن، همانطور که در پیش بینی مدل مشخص شده بود، در تست تجربی نیز همان سرعت اولیه منجر به خروج گلوله از مخزن شد. این در حالیست که پیش‌بینی مدل برای گلوله‌هایی که از مخزن عبور نکرده بود نیز در تست تجربی صحت پیدا کرد. نتایج بدست آمده از هر سه روش، انطباق قابل قبولی با یکدیگر دارند.

6- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر را می‌توان مدل جامع نام‌گذاری نمود. این مدل، مدلی تحلیلی بر اساس مجموع انرژی‌های جذب شده از گلوله می‌باشد و علاوه بر این که از اغلب مکانیزم‌های جذب انرژی موجود در دو مدل مورای-هاین [1] و نیک-شارو [2-4] استفاده نموده است، از سه مکانیزم جذب انرژی، که شامل انرژی جذب شده ناشی از اصطکاک بین گلوله و هدف E_{Fr} ، انرژی جذب شده ناشی از کار انجام شده توسط جابه‌جایی راس مخروط E_{Dis} و انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک - پلاستیک الیاف اولیه E_{EP} می‌باشد نیز اضافه گردیده است. در این مدل سعی گردیده است تا با طرح مکانیزم‌های جذب انرژی مهم و عمده مدلی ساده، کارآمد و در عین حال با دقت مناسب ارائه گردد تا علاوه بر سادگی تطابق خوبی با داده‌های تجربی و المان محدود

M	مدول کششی کامپوزیت	در حالت کلی برخی از نتایج بدست آمده در مطالعه حاضر به طور خلاصه به صورت زیر ارائه گردیده است.
mc	جرم مخروط متحرک	(1) مدلی تحلیلی بر اساس مجموع انرژی های جذب شده از گلوله ارائه گردیده است.
mp	جرم گلوله	(2) سه مکانیزم جذب انرژی نسبت به مدل های ارائه شده قبلی، شامل انرژی جذب شده ناشی از اصطکاک بین گلوله و هدف E_{Fr} ، انرژی جذب شده ناشی از کار انجام شده توسط جابجایی راس مخروط E_{Dis} و انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک - پلاستیک الیاف اولیه E_{EP} اضافه شده است.
N	تعداد لایه های برش سوراخ ها	(3) با افزایش سرعت رویداد برخورد بالستیکی، بیشتر از حد بالستیکی، افزایش سرعت باقیمانده گلوله شیبی تندتر نسبت به سرعت برخورد دارد.
P	بار وارده به هدف از طرف گلوله	(4) مدت زمان ادامه تماس گلوله با هدف هنگام افزایش سرعت واقعه برخورد بالستیکی کاهش می یابد.
Pd	درصد لایه لایه شدگی	(5) سهم مکانیزم های جذب انرژی در سرعت های برخورد و جنس ها و ضخامت های مختلف هدف متفاوت می باشد، و با تغییر هر کدام از موارد بالا متغیر است.
Pm	شعاع مخروط تشکیل شده پشت صفحه کامپوزیتی (شعاع بیضی در هر زاویه دلخواه مثل θ)	(6) اهمیت مکانیزم های جذب انرژی بسته به جنس هدف مورد مطالعه و حتی نوع و چگونگی ساخت متفاوت است.
Rc	گون شعاع بزرگ بیضی	(7) مدل حاضر به عنوان مدل جامع پیش بینی حد بالستیکی و سرعت خروجی گلوله از هدف کامپوزیتی نام گذاری شده است.
Rc^{max}	گون شعاع کوچک بیضی	
Rc^{min}	استحکام برش سوراخ	
Ssp	ضخامت لایه ها	
Tl	ضخامت هدف کامپوزیتی	
T	حجم کرنش کامپوزیت برای شکست کششی	
V	سرعت برخورد گلوله با هدف	
v	سرعت مخروط متحرک	
Vc	سرعت عمودی خروجی گلوله از هدف	
Vn	سرعت عمودی اولیه گلوله هنگام برخورد با هدف	
$Vn0$	سرعت حد بالستیکی	
$v0$	در راستای مماسی در هدف کامپوزیتی تغییرات سرعت	
ΔVt	در راستای مماسی در هدف کامپوزیتی تغییرات سرعت	
ΔVn	زمان عبور گلوله از هدف	
Δt	زمان صرف شده برای عبور گلوله از هدف کامپوزیتی	
t	معادل بیشترین خیز تیر	
w	تغییر مکان راس مخروط تشکیل شده پشت هدف	
δ	کرنش	
ϵ	زاویه برخورد	
θ	ضریب اصطکاک بین گلوله و هدف کامپوزیتی	
μ	چگالی هدف کامپوزیتی	
ρ		

7- فهرست علائم

Aql	ضریب کاهش مساحت شبه نواری	
ap	شتاب کاهنده گلوله در حین برخورد با هدف	
D	قطر گلوله	
E_c	انرژی جذب شده در نقطه شکست کششی کامپوزیت در واحد حجم	
E_{DI}	جذب شده ناشی از لایه لایه شدگی انرژی	
E_{Dis}	انرژی ناشی از تغییر مکان راس مخروط ناشی از نیروی گلوله	
E_{EP}	انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک پلاستیک الیاف اولیه	
E_{ED}	انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه	
E_{EI}	انرژی جذب شده توسط الیاف اولیه در اثر تغییر شکل الاستیک	
E_{Fr}	انرژی ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی	
E_{KE}	انرژی جنبشی ایجاد شده در پشت صفحه کامپوزیتی تحت برخورد بالستیکی	
E_l	انرژی از دست رفته در طول برخورد	
E_{mt}	انرژی جذب شده توسط زمینه در واحد حجم	
E_{Mc}	انرژی جذب شده ناشی از ترک خوردگی زمینه	
E_{Pl}	انرژی جذب شده توسط الیاف ثانویه در اثر تغییر شکل پلاستیک	
E_{Sp}	جذب شده ناشی از برش سوراخ انرژی	
E_{Tr}	انرژی جذب شده ناشی از شکست کششی الیاف اولیه	
E_{Total}	توسط هدف کامپوزیتی مجموع انرژی جذب شده	
F_{pn}	نیروی در راستای عمودی توسط گلوله به هدف	
G_t	مدول برشی ضخامت	
G_{Tcd}	II نرخ افزایش انرژی کرنشی دینامیکی بحرانی در مود	
l	معادل طول تیر	

8- مراجع

- [1] Morye, S. S. Hine, P. J. Duckett, R. A. Carr, D. J. Ward, I. M., "Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites Upon Ballistic Impact" Compos Sci Technol, 60, pp. 2631-2642, 2000.
- [2] Naik, N. K. Reddy, B. C. K. Shrirao, P., "Analytical Modeling of Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites" In: Ko FK (Ed.), Proceedings of TEXCOMP - 6, Drexel University, pp. 6. 08, 2002.
- [3] Naik, N. K. Shrirao, P. Reddy, B. C. K., "Ballistic Impact Behaviour of Woven Fabric Composites" Parametric studies, J Materials Science and Engineering A 412, pp. 104-116, 2005.
- [4] Naik, N. K. Shrirao, P., "Composite structures under ballistic impact", Composite Structures. pp. 579-590, 2004.
- [5] Zhu, G. Goldsmith, W. Dharan, CK., "Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles I. Experimental Investigation". Int J Solids Struct, pp. 399-419, 1992.
- [6] Wilkins, M.L., "Ballistic Materials and Penetration Mechanics". Laible R.C. Ed. (Elsevier Scientific Publish). pp. 225-252; 1980.
- [7] Wen, H. M., "Penetration and Perforation of Thick FRP Laminates" Compos Sci Technol, 6, pp. 1163-72, 2001.
- [8] Walker, J.D. "Ballistic Limit of Fabrics With Resin", 19th International Symposium of Ballistics, pp. 7-11, Interlaken, Switzerland, May 2001.

- [9] Pol, M. H. Liaghat, G. H. Mazdak, S., "Effect of Nanoclay Particles on the Ballistic Behavior of Glass / Epoxy Composites- Experimental Investigation" Journal. Modares Mechanical. Engineering, Vol. 13, No 4, pp. 98-104, 2013. (In Persian)
- [10] Sheikh, A. H. a. H. Bull, P. H. P. H. Kepler, J. A. J. a., "Behaviour of multiple composite plates subjected to ballistic impact" Composite. Science. Technology, Vol. 69, No. 6, pp. 704-710, May 2009.
- [11] Lee, S. WR, A. Sun, CT., "Quasistatic Penetration Model for Composite Laminates". J Compos Mater, 27. pp. 251-71, 1993.
- [12] Ellis, RL., "Ballistic Impact Resistance of Graphite Epoxy Composites with Shape Memory Alloy and Extended Chain Polyethylene Spectra Hybrid Components". Msc Thesis, Mechanical Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 1996.
- [13] Hedayatian, M. Liaghat, G. H. Rahimi, G. H. Pol. M.H., "Experimental study on dynamic response of grid cylindrical composite structures under high velocity impact" Modares Mechanical. Engineering, Vol. 14, No 2, pp. 41-46, 2014. (In Persian)
- [14] Hedayatian, M. Liaghat, G. H. Rahimi, G. H. Pol. M. H., "Numerical and Experimental Analyses Projectile Penetration in Grid Cylindrical Composite Structures Under High Velocity Impact" Modares Mechanical. Engineering, Vol. 14, No 9, pp. 17-26, 2014. (In Persian)
- [15] Sabouri, H. Ahmadi, H. Liaghat, G. H., "Ballistic Impact Perforation Into Glare Target: Experiment, Numerical Modeling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence", International Journal Vehicle Structures & Systems, Vol. 3, No.1, pp. 178-183. 2011.
- [16] Payeganeh, G. H. Ashenai Ghasemi, F. Malekzadeh, K., "Dynamic Response of Fiber-Metal Laminates(Fmls) Subjected to Low-Velocity Impact", Thin- Walled Structures, Vol. 47, pp. 62-70, 2010