

بررسی تحلیلی و تجربی نفوذ کامل پرتابه‌های با دماغه اجایو در اهداف کامپوزیتی کربن / اپوکسی

مصطفی حقیقت پور^۱، خداداد واحدی^۲، علی مهدی پور عمرانی^{۳*}

۱- تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- تهران - دانشگاه امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۱/۰۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۷/۱۱)

چکیده

مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف، کاربرد زیادی در صنعت از جمله سازه‌های دریایی، ساختارهای فضایی و زره‌های سبک وزن برای حفاظت بالستیکی دارد. علت مهم استفاده از این مواد در صنعت، خواص مکانیکی خوب، انعطاف پذیری بیشتر، ساخت آسان و مقاومت در برابر ضربه می‌باشد. مطالعات وسیعی در جهت شناسایی مکانیزم‌های تغییر شکل در حین فرآیند نفوذ و نفوذ کامل در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف انجام شده است. ون با فرض عدم اصطکاک بین دماغه پرتابه و هدف و با استفاده از قانون بقای انرژی، معادلات عمق نفوذ، سرعت باقیمانده و سرعت حد بالستیک برای پرتابه‌های با دماغه مختلف ارائه داده است. در این تحقیق، برای پرتابه‌های با دماغه اجایو، مدل جدیدی ارائه می‌شود. در این مدل با استفاده از قانون دوم نیوتن، معادلاتی برای نفوذ کامل پرتابه‌های با دماغه اجایو و نیمکروی به دست آمده است. برای پرتابه اجایو به قطر ۸/۶۹ میلی‌متر و جرم ۹/۵۳ گرم و هدف کامپوزیت کربن / اپوکسی تست تجربی انجام شد. با استفاده از نتایج تجربی، معادله جدیدی برای ثابت تجربی مدل تحلیلی (β) ارائه شده است. با مقایسه نتایج تحلیلی روش جدید و روش ون و نتایج تجربی، مشاهده شد که مدل جدید در مقایسه با مدل ون از دقت بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: نفوذ کامل، دماغه‌های اجایو و نیم کروی، روش تحلیلی، روش تجربی، سرعت باقیمانده، سرعت حد بالستیک.

۱- مقدمه

مکانیزم‌های شکست و نفوذ این کامپوزیت انجام شده است. ون [۱] یک مدل تحلیلی برای نفوذ در چند لایه‌های ضخیم تقویت شده با الیاف برای سرعت‌های مختلف و با شکل دماغه مختلف ارائه داد. این فرمولاسیون بر این فرض است که تغییر شکل‌ها موضعی بوده و فشار متوسط وارده توسط هدف که در مقابل پرتابه مقاومت می‌کند، از

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به‌طور وسیعی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، وسایل ورزشی، به‌دلیل استحکام به وزن بالا استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این کامپوزیت‌ها، جلیقه‌های ضد گلوله می‌باشد. تاکنون مطالعات تحلیلی بسیاری بر روی

* E-mail: a.mehdipoor@gmail.com

۱- کارشناس ارشد

۲- دانشیار

۳- استادیار

تقویت شده با الیاف شیشه با ترکیبات مختلف را در محدوده سرعت‌های برخورد ۳۰ تا ۱۰۰ متر بر ثانیه بررسی کردند. کانتول [۷]، تأثیر هندسه هدف را بر روی صفحات کامپوزیتی با سرعت برخورد کم بررسی نمود. آزمایش‌ها بر روی صفحات مدور یا چهارگوش CFRP^۲ با پرتابه نیمه کروی انجام شد. نتایج نشان داد که هدف هیچ تأثیری بر روی مدهای شکست ندارد. کانتول تست نفوذ با سرعت بالا را بر روی صفحات CFRP به ضخامت ۶ میلی‌متر با یک پرتابه ساچمه‌ای یک گرمی انجام داد. همچنین اثر ترتیب الیاف و هندسه هدف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که تغییر هندسه هدف هیچ تأثیر مهمی بر روی ایجاد آسیب اصلی ندارد [۸].

زاو [۹]، مدهای شکست در صفحات کامپوزیتی را در سرعت‌های بالا بررسی نمود. سه صفحه مختلف توسط پرتابه دماغه نیمه‌کروی در محدوده سرعت ۱۰ - ۳۰۰ متر بر ثانیه مورد تست قرار گرفتند. با در نظر گرفتن تعادل انرژی، معادلات سرعت باقیمانده برحسب متغیرهای جرم پرتابه و سرعت برخورد تعیین شد. همچنین نتایج نشان داد که ترتیب لایه‌ها و ضخامت هدف نقش مهمی در جذب انرژی ایفا می‌کنند.

هازل و همکاران [۱۰] برخورد قائم و مایل پرتابه‌های فولادی با دماغه کروی با صفحات بافته شده الیاف کربن با ضخامت‌های ۳ و ۶ میلی‌متری در محدوده سرعت ۱۷۰ تا ۳۷۴ متر بر ثانیه را به صورت تجربی بررسی نمودند. آنها مشاهده نمودند که برای برخورد قائم در سرعت‌های برخورد بالا، یک جرم مخروطی از صفحه، به همراه نوک پرتابه از هدف خارج می‌شود. به علاوه انرژی منتقل شده به صفحه هدف، با انرژی برخورد افزایش می‌یابد. درجه لایه‌لایه شدن در اهداف ضخیم‌تر کاهش یافته و در نتیجه سبب تغییر مکانیزم نفوذ از پتالینگ به پلاگینگ می‌شود. در برخورد مایل، انرژی جنبشی بیشتری در مقایسه با برخورد نرمال با ضخامت‌های یکسان، از پرتابه به هدف منتقل می‌شود. علت اصلی این تفاوت، اثر هندسی می‌باشد.

موری [۱۱-۱۲] مدل ساده‌ای برای محاسبه جذب انرژی توسط کامپوزیت‌های پلیمری تحت برخورد بالستیک ارائه داد. در این مدل، سه جزء اصلی برای توزیع تلفات انرژی توسط پرتابه در طول برخورد بالستیک مشخص شد. این سه جزء عبارتند از: انرژی جذب شده در شکست کششی کامپوزیت، انرژی تبدیل شده به تغییر شکل الاستیک کامپوزیت و انرژی تبدیل شده به انرژی جنبشی قسمتی از کامپوزیت. این سه مقدار با هم ترکیب شده و مقادیر حد بالستیک کامپوزیت تعیین می‌شود. مشاهده شده است که اندازه ناحیه تغییر شکل یافته و تغییر شکل برشی ایجاد شده در صفحه پشتی کامپوزیت به طور مستقیم به ضریب برشی صفحه‌ای مواد وابسته است.

گو [۱۳] مدلی تحلیلی برای محاسبه کاهش انرژی جنبشی و سرعت باقیمانده پرتابه در هدف پارچه‌ای بافته شده چند لایه، ارائه داد. بر

دو بخش تشکیل می‌شود. یک بخش فشار مقاوم شبه‌استاتیکی چسباننده به خاطر تغییر شکل الاستیک-پلاستیک مواد چند لایه است و بخش دیگر یک فشار مقاوم دینامیکی ناشی از تأثیرات سرعت است. وی نشان داد که نتایج تحلیلی با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد. همچنین وی یک مدل تحلیلی برای نفوذ و رسوخ کامل کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف که توسط پرتابه‌های با دماغه مخروطی انجام می‌شود، ارائه داد. تفاوت این مدل با مدل قبلی این است که در مدل قبلی سرعت برخورد به هدف در کلیه روابط در نظر گرفته شده بود، ولی در این مدل در طول مسیر سرعت لحظه‌ای استفاده شده است. در این مدل می‌توان سرعت در مکان‌ها و زمان‌های مختلف را به دست آورد [۲].

اولون [۳] اثر شکل پرتابه روی پنل‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی در طول سوراخ شده هدف بررسی کرد. وی که از معادلات تحلیلی ون استفاده کرده بود، به این نتیجه رسید که پرتابه با دماغه مخروطی در سرعت‌های بالا بیشترین حد بالستیک را دارد. همچنین مکانیزم‌های شکست پلاگینگ و تفکیک الیاف و یا ترکیب هر دو در لایه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی با شکل دماغه‌های مختلف مشاهده شده است.

نیک [۴] رفتار بالستیک کامپوزیت‌های پارچه‌ای بافته شده را به صورت دوبعدی و با استفاده از روابط تحلیلی بررسی نمود. وی دو نوع کامپوزیت کربن/اپوکسی و الیاف شیشه/اپوکسی را مورد مطالعه قرار داد. همچنین مکانیزم‌های جذب انرژی شناسایی شدند که این مکانیزم‌ها شامل تشکیل مخروط روی صفحه پشتی هدف، شکست کششی الیاف‌های اولیه، تغییر شکل الیاف‌های ثانویه، لایه‌لایه شدن، ترک زمینه، برش پلاگ و اصطکاک می‌باشد. فرمول‌های تحلیلی برای هر مکانیزم جذب انرژی، تعیین شده و سپس برای هر بازه زمانی انرژی جذب شده کل و همچنین کاهش سرعت پرتابه تعیین گردید. با استفاده از این روابط می‌توان، حد بالستیک، مدت تماس در حد بالستیک، شعاع سطحی مخروط شکل گرفته و شعاع ناحیه آسیب دیده را به دست آورد.

لوپز [۵] یک مدل تحلیلی برای برخورد سرعت بالا روی صفحات لایه‌ای CFRP^۱ با ضخامت نازک ارائه داد. در این مدل که مبتنی بر تعادل انرژی می‌باشد، انرژی جنبشی پرتابه توسط هدف با سه مکانیزم مختلف له شدن صفحه، انتقال مومنتوم خطی و شکست کششی الیاف جذب می‌شود. هدف اصلی این مدل تعیین سرعت باقیمانده و سرعت حد بالستیک به صورت تحلیلی می‌باشد. با مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی، تطابق خوبی مشاهده شده است.

بابو و همکاران [۶] به وسیله روابط تحلیلی، یک رابطه‌ای مبتنی بر اصل جذب انرژی برای تعیین حد بالستیک مواد ارائه دادند. آنها در این مدل، نفوذ پرتابه با دماغه مخروطی از جنس فولاد در کامپوزیت‌های

2- Glass fiber Reinforcement Plastic

1- Carbon Fiber Reinforcement Plastic

که V_n سرعت عمود بر سطح پرتابه بوده و برابر است با:

$$V_n = V_z \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

که در φ نشان داده شده است. بنابراین می توان نوشت:

$$\sigma_n = [\sigma_e + \beta V_z \sqrt{\rho_t \sigma_e} \cdot \cos\varphi] = [A + C \cdot V_z \cdot \cos\varphi] \quad (5)$$

که

$$C = \beta \sqrt{\rho_t \sigma_e} \quad (6)$$

در معادلات فوق، ρ_t چگالی کامپوزیت، V_s سرعت برخورد پرتابه و β ثابت تجربی می باشد.

۲-۲- بررسی نفوذ کامل پرتابه‌ی اجایو در هدف کامپوزیتی

شکل (۱) شماتیکی از هندسه پرتابه را نشان می دهد. پارامتر ψ که با CRH نشان داده می شود، برابر است با:

$$CRH = \psi = \frac{s}{d} = \frac{s}{2a} \quad (7)$$

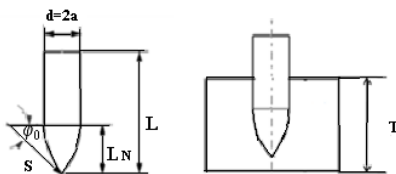
که s شعاع دماغه اجایو و a شعاع ساق پرتابه می باشد. زاویه φ_0 برابر است با:

$$\sin \varphi_0 = \frac{2\psi - 1}{2\psi} \quad (8)$$

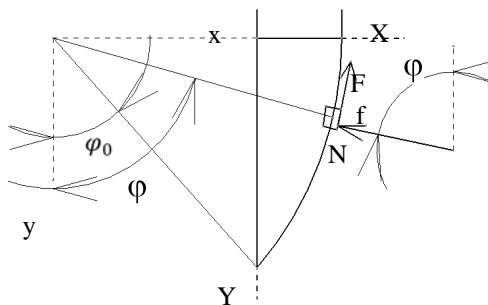
طول دماغه پرتابه برابر است با:

$$L_N = a\sqrt{4\psi - 1} \quad (9)$$

شکل (۲) دیاگرام نیروی اعمالی به دماغه پرتابه را نشان می دهد. برآیند نیروها در جهت محور پرتابه همان نیروی مقاومتی می باشد.



شکل ۱- مشخصات هندسی پرتابه‌ی اجایو.



شکل ۲- دیاگرام نیروهای اعمالی به دماغه‌ی اجایو.

اساس قانون بقای انرژی، انرژی جذب شده پرتابه معادل با انرژی جنبشی و انرژی کرنشی پارچه در ناحیه تغییر شکل یافته می باشد. همچنین در این مدل از تغییر شکل پرتابه و تولید حرارت توسط عکس العمل پرتابه و هدف صرف نظر شده بود. سپس کاهش انرژی جنبشی و سرعت باقیمانده پرتابه بعد از نفوذ کامل هدف، محاسبه گردید. پیش بینی سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده توسط پارچه‌ها، تطابق خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی را نشان داد.

در این مقاله، مدل تحلیلی جدیدی بر اساس مدل تحلیلی ون برای پرتابه با دماغه اجایو ارائه می شود. همچنین برای پرتابه با دماغه اجایو به قطر ۸/۶۹ میلی متر و جرم ۹/۵۳ گرم و هدف کامپوزیتی کربن/اپوکسی به ضخامت ۲/۵ میلی متر آزمایش تجربی انجام شده و با نتایج تحلیلی مقایسه می شود. همچنین بر اساس نتایج تجربی، یک معادله جدید برای ثابت تجربی (β) در مدل ون ارائه می شود.

۲- روش تحلیلی نفوذ کامل

برای بررسی نفوذ کامل پرتابه با دماغه اجایو و نیمکره‌ی در اهداف کامپوزیتی، از مدل ون استفاده می شود.

۲-۱- فرضیات مسئله

برای ارائه این مدل، فرضیاتی استفاده شده است که عبارتند از:

- رفتار کامپوزیت، موضعی در نظر گرفته می شود.
- فشار متوسط وارده به پرتابه که توسط هدف ایجاد می شود (σ_n)، از دو بخش تشکیل می شود؛ بخش اول، فشار مقاوم شبه استاتیکی چسباننده به دلیل تغییر شکل الاستیک - پلاستیک مواد کامپوزیت (σ_s) و بخش دیگر، فشار مقاوم دینامیکی (σ_d) که ناشی از تأثیرات سرعت است [۱]. در این صورت می توان نوشت:

$$\sigma_n = \sigma_s + \sigma_d \quad (1)$$

- فرض می شود که فشار مقاوم شبه استاتیکی چسباننده برابر با حد الاستیک خطی فشاری در جهت ضخامت کامپوزیت (σ_e) است؛ یعنی $\sigma_e = \sigma_s$

- فشار مقاوم دینامیکی، تابعی از سرعت پرتابه، چگالی هدف و حد الاستیک خطی فشاری در جهت ضخامت می باشد. در این صورت می توان نوشت:

$$\sigma_d = \beta V_n \sigma_e \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} \quad (2)$$

- پرتابه در حین فرآیند نفوذ صلب و بدون تغییر شکل باقی می ماند.
- برخورد پرتابه به هدف به صورت عمود بر سطح می باشد.
- در نتیجه فشار متوسط وارده به پرتابه توسط هدف از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma_n = [\sigma_e + \beta V_n \sqrt{\rho_t \sigma_e}] \quad (3)$$

رفسون می‌توان آن را حل نمود.

یکی از پارامترهای مهم در بحث بالستیک نهایی، سرعت حد بالستیک می‌باشد. به سرعتی از پرتابه که در هدف به‌طور کامل نفوذ کرده و سرعت باقیمانده آن صفر باشد، سرعت حد بالستیک گویند. در این حالت برای تعیین سرعت حد بالستیک، کافی است که در معادله (۱۸)، سرعت باقیمانده صفر قرار داده شود. به عبارتی دیگر:

$$V_s = V_b \& V_r = 0 \quad (۱۹)$$

بنابراین سرعت حد بالستیک برابر است با:

$$V_b = \frac{E}{H} \ln \left(1 + \frac{H}{E} V_b \right) + \frac{2\pi s^2 TH}{m} \quad (۲۰)$$

۲-۳- بررسی نفوذ کامل پرتابه با دماغه نیم کرووی در هدف

کامپوزیتی

پرتابه‌های با دماغه نیم کرووی، حالت خاصی از پرتابه‌های اجایو می‌باشند. در این صورت برای تعیین روابط مربوط به نفوذ، کافی است که در معادله مربوط به پرتابه اجایو، $\psi = 0.5$ ، $L_N = a$ و $\varphi_0 = 0$ قرار داده شود. در این صورت سرعت باقیمانده و سرعت حد بالستیک به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$V_r = V_s + \frac{E}{H} \ln \left(\frac{1 + \frac{H}{E} V_r}{1 + \frac{H}{E} V_s} \right) - \frac{2\pi s^2 TH}{m} \quad (۲۱)$$

$$V_b = \frac{E}{H} \ln \left(1 + \frac{H}{E} V_b \right) + \frac{2\pi s^2 TH}{m} \quad (۲۲)$$

که

$$E = A \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \pi \mu \right] \quad (۲۳)$$

$$H = C \left[\frac{1}{3} \mu + 1 \right] \quad (۲۴)$$

۳- نتایج و بحث

پرتابه مورد استفاده برای تست، پرتابه‌ای با دماغه اجایو از جنس فولاد MO40 می‌باشد. برای اینکه پرتابه در حین نفوذ، صلب و بدون تغییر شکل باقی بماند، سطح آن به میزان ۵۲ راکول سخت شده و برای حذف اثر اصطکاک، سطح آن سنگ زده می‌شود. جرم گلوله ۹/۵۳ گرم می‌باشد. شکل (۳) مشخصات هندسی این گلوله را نشان می‌دهد.

هدف مورد تست، کامپوزیت کربن/اپوکسی می‌باشد. الیاف کربن مورد استفاده، کربن T300 و رزین از نوع اپوکسی LV8911 با هاردنر HA41 می‌باشد.

که N نیروی عمودی اعمالی به نوک پرتابه و F_r نیروی اصطکاک بین پرتابه و هدف می‌باشد. با تعیین این نیروها برحسب سایر پارامترهای پرتابه، می‌توان نیروی مقاوم بر روی پرتابه را به‌دست آورد:

$$F_1 = 2\pi s^2 \int_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} (\sin\varphi - \sin\varphi_0) \cdot [\mu \sin\varphi + \cos\varphi] \sigma_n d\varphi \quad (۱۰)$$

از ترکیب معادله (۵) و (۱۰)، نیروی مقاوم به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$F_1 = 2\pi s^2 \int_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} (\sin\varphi - \sin\varphi_0) \cdot [\mu \sin\varphi + \cos\varphi] [A + C \cdot V_z \cdot \cos\varphi] d\varphi \quad (۱۱)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق و ساده‌سازی، می‌توان نوشت:

$$F_1 = 2\pi s^2 (E + HV_z) \quad (۱۲)$$

که مقادیر E و H از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$E = A \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \pi \mu - \sin\varphi_0 - \frac{1}{2} \mu \varphi_0 - \frac{1}{4} \mu \sin 2\varphi_0 + \frac{1}{2} \sin\varphi_0^2 \right] \quad (۱۳)$$

$$H = C \left[\frac{1}{3} \mu - \frac{1}{2} \mu \sin\varphi_0 - \frac{1}{4} \pi \sin\varphi_0 + \frac{1}{6} \mu (\sin\varphi_0)^3 + \frac{1}{3} (\cos\varphi_0)^3 + \frac{1}{2} \varphi_0 \sin\varphi_0 + \frac{1}{4} \sin\varphi_0 \sin 2\varphi_0 \right] \quad (۱۴)$$

براساس قانون دوم نیوتن، می‌توان نوشت:

$$m \frac{dV_z}{dt} = -F_1 \quad (۱۵)$$

با ترکیب کردن معادله (۱۲) و (۱۵)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$m V_z \frac{dV_z}{dz} = -2\pi s^2 (E + HV_z) \quad (۱۶)$$

با انتگرال‌گیری از معادله (۱۶) می‌توان سرعت باقیمانده را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\int_{V_s}^{V_r} \frac{V_z dV_z}{(E + HV_z)} = \int_0^T \frac{-2\pi s^2}{m} dz \quad (۱۷)$$

$$V_r = V_s + \frac{E}{H} \ln \left(\frac{1 + \frac{H}{E} V_r}{1 + \frac{H}{E} V_s} \right) - \frac{2\pi s^2 TH}{m} \quad (۱۸)$$

این معادله، یک معادله غیر خطی است که با استفاده از روش نیوتن-

با داشتن نتایج تجربی سرعت باقیمانده، می توان روابط نیمه تجربی برای این نتایج به دست آورد. چندین رابطه بین سرعت باقیمانده و سرعت برخورد ارائه شده است [۱۴]. رابطه ی اول با فرض ثابت بودن نیروی نفوذ به صورت زیر می باشد:

$$V_r = \sqrt{V_s^2 - V_{bl}^2} \quad (25)$$

در این رابطه، V_{bl} سرعت حد بالستیک می باشد. بنابراین با مشخص بودن سرعت حد بالستیک می توان، نمودار تغییرات سرعت باقیمانده بر حسب سرعت برخورد را رسم نمود.

رابطه دوم که به معادله لامبرت مشهور می باشد، به صورت زیر بیان می شود [۱۵]:

$$V_r = \alpha (V_s^p - V_{bl}^p)^{\frac{1}{p}} \quad (26)$$

که α تابعی از جرم پرتابه و جرم کامپوزیت خارج شده از هدف بوده و برابر است با:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{m'}{m}}} \quad (27)$$

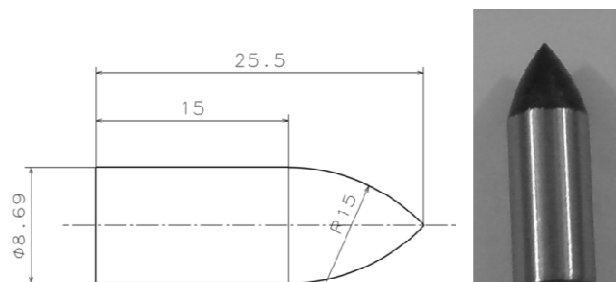
برای تعیین مقدار جرم خارج شده از کامپوزیت (m')، کامپوزیت ها را قبل و بعد از تست، وزن کرده و مقدار میانگین جرم باقیمانده تعیین می شود. بر اساس نتایج تست، مقدار این جرم برابر با ۰/۶۱ گرم می باشد. بنابراین مقدار α برابر است با:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{0.61}{9.53}}} = 0.969$$

مقدار p برای پرتابه صلب برابر با ۲ می باشد [۱۵]. در نهایت با سرعت حد بالستیک ۳۹/۳۴ متر بر ثانیه و مقادیر α و p ، می توان رابطه نیمه تجربی لامبرت را برای هدف کامپوزیت کربن/اپوکسی و پرتابه اجایو تعیین نمود.

جدول ۱- مقادیر تجربی سرعت باقیمانده پرتابه اجایو و هدف کربن/اپوکسی.

وضعیت	سرعت باقیمانده (m/s)	سرعت برخورد (m/s)	نمونه
عبور از هدف	۸۴/۳۴	۹۱/۷۸	۱
عبور از هدف	۷۱/۰۳۷	۸۶/۲۳	۲
عبور از هدف	۵۲/۹۷	۷۰/۴۴	۳
کمانه کردن پرتابه	-	۳۲	۴
حد بالستیک	-	۳۹/۳۴	۵



شکل ۳- مشخصات هندسی گلوله با دماغه اجایو

این نوع رزین از نوع رزین گرم بوده و از ترکیب کردن ۱۰۰ گرم رزین با ۹۰ گرم هاردنر به دست می آید. پس از آماده شدن رزین، لایه نازک پلاستیکی برای جلوگیری از چسبیدن کامپوزیت به سطح قرار داده و توسط قلم مو رزین به سطح پلاستیکی آغشته می شود. سپس لایه های پارچه ای کربن قرار داده می شود. تعداد ۱۵ لایه کربن در ساخت این هدف استفاده می شود. پس از آماده شدن نمونه، آن را در زیر پرس به مدت ۴ الی ۵ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده و در نهایت به مدت ۷ ساعت در کوره در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می شود. کامپوزیت به صورت مربع به طول ۱۴/۵ سانتی متر و ضخامت ۲/۵ میلی متر برش داده می شود. روش تعیین سرعت حد بالستیک به این صورت است که ابتدا پرتابه با یک سرعت مشخص که معمولاً بر اساس روش شبیه سازی به دست می آید، شلیک می شود. اگر پرتابه از هدف عبور کند، شلیک دوم با سرعت کمتری انجام می شود. اگر در این حالت پرتابه عبور نکند، پرتابه با سرعت بیشتر شلیک می شود. این روند آنقدر ادامه می یابد که سرعت حد بالستیک تعیین شود. نتایج تجربی این پژوهش در آزمایشگاه ضربه و نفوذ پژوهشگاه پلیمر انجام شده است. در این آزمایشگاه از اسلحه گازی برای شلیک استفاده می شود که قطر لوله این اسلحه ۸/۶۹ میلی متر و طول آن ۲ متر می باشد. دو جفت صفحه راه انداز برای اندازه گیری سرعت قبل و بعد از برخورد استفاده می شود. فاصله بین صفحات راه انداز قبل برخورد حدود ۳۵ سانتی متر و فاصله بین صفحات بعد برخورد ۱۴ سانتی متر می باشد. با عبور پرتابه از صفحه راه انداز اول، زمان سنج فعال شده و با عبور از صفحه دوم، زمان سنج متوقف می شود. در نتیجه با مشخص بودن زمان و فاصله عبور از دو صفحه، می توان سرعت را تعیین نمود. نکته مهم در مورد صفحات راه انداز بعد برخورد این است که، از فول های آلومینیومی ساخته شده اند. این کرنوگراف علاوه بر سنجش سرعت بعد از برخورد، به عنوان صفحه شاهد استفاده شده و می تواند عدم نفوذ و یا نفوذ پرتابه را مشخص کند. جدول (۱) مقادیر سرعت برخورد و باقیمانده برای پرتابه اجایو و هدف کامپوزیت کربن/اپوکسی را نشان می دهد. شکل (۴) آسیب کامپوزیت در اثر شلیک پرتابه با دماغه اجایو با سرعت حد بالستیک را نشان می دهد.

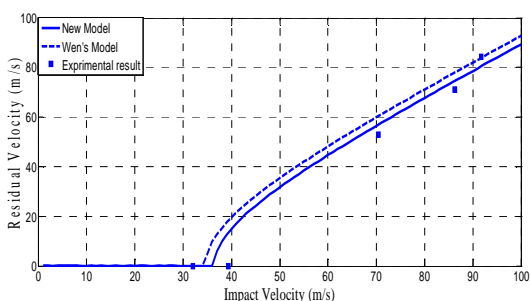
جدول (۳) مشخصات پرتابه اجابو و هدف کامپوزیتی کربن اپوکسی را نشان می‌دهد. در این جدول، β ثابت تجربی بوده که براساس نتایج تست تعیین می‌شود. به این صورت که براساس سرعت‌های برخورد و باقیمانده و با استفاده از روابط تحلیلی، مقادیر مختلف β تعیین شده و سپس مقدار میانگین در نظر گرفته می‌شود. برای پرتابه‌های اجابو و نیمکروی، از رابطه زیر برای تعیین مقدار ثابت تجربی استفاده می‌شود.

$$\beta = \frac{3}{4\eta} + 3 \quad (30)$$

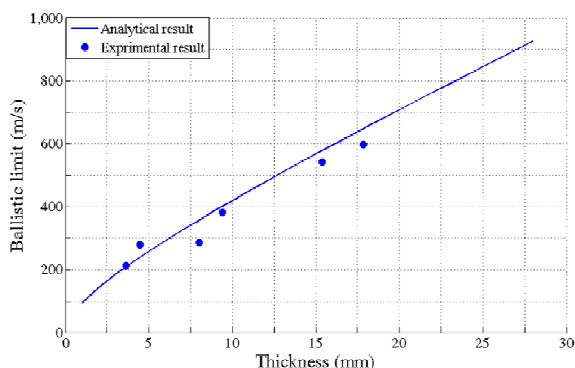
شکل (۶) تغییرات سرعت باقیمانده برحسب سرعت برخورد برای پرتابه‌ی اجابو به قطر ۸/۶۹ میلی‌متر و جرم ۹/۵۳ گرم در هدف کامپوزیت کربن/اپوکسی به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

جدول (۴) نتایج تحلیلی و تجربی را برای این پرتابه بیان می‌کند.

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که روابط تحلیلی (۱۸) و (۲۰)، تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. درصد خطای میانگین در این حالت برابر با ۶/۵ درصد می‌باشد. براساس معادله (۲۰)، سرعت حد بالستیک ۳۶ متر بر ثانیه بوده در صورتی که در روش ون، ۳۴ متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین معادلات ارائه شده در این مقاله، خطای کمتری نسبت به روش ون دارد. شکل (۷) مقایسه نتایج تجربی برای پرتابه با دماغه نیمکروی را نشان می‌دهد. کامپوزیت از جنس Eglass/polyster به چگالی $\rho=1650 \text{ kg/m}^3$ و $\sigma_e=225 \text{ Mpa}$ و پرتابه نیمکروی دارای قطر ۱۰ میلی‌متر و جرم ۶ گرم و $\psi=0.5$ می‌باشد.



شکل ۶- نتایج تجربی و تحلیلی برای پرتابه اجابو و هدف کامپوزیت کربن/اپوکسی به ضخامت ۲/۵ mm



شکل ۷ - تغییرات سرعت حد بالستیک برحسب ضخامت برای دماغه نیمکروی [۱].



شکل ۴- نمای پشت هدف کامپوزیتی در اثر برخورد با سرعت حد بالستیک.

با فرض اینکه نیروی نفوذ متناسب با مربع سرعت باشد، رابطه نیمه تجربی دیگری بین سرعت باقیمانده و برخورد به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

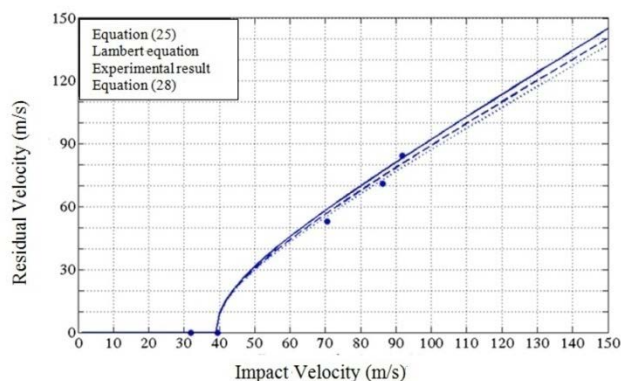
$$V_r = \sqrt{\left[1 - \frac{2C_2h}{m}\right] V_s^2 - \frac{2C_0h}{m}} \quad (28)$$

با مشخص بودن h (ضخامت هدف) و m (جرم پرتابه) و همچنین سرعت حد بالستیک، می‌توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$C_0 = \frac{V_{bl}^2}{2h} (m - 2C_2h) \quad (29)$$

از ترکیب کردن دو معادله (۲۸) و (۲۹) و با استفاده از داده‌های تجربی مانند سرعت حد بالستیک، جرم پرتابه و ضخامت هدف، می‌توان مقدار C_2 را تعیین کرده و در نهایت نمودار تغییرات سرعت باقیمانده برحسب سرعت برخورد را رسم نمود. مقدار C_2 در این تست برابر با ۰/۲ می‌باشد.

شکل (۵) نمودار تغییرات سرعت باقیمانده برحسب سرعت برخورد برای پرتابه اجابو و هدف کامپوزیتی براساس رابطه نیمه تجربی لامبرت و روابط (۲۵) و (۲۸) را نشان می‌دهد. جدول (۲) مقادیر نتایج حاصل از تست تجربی و نیمه تجربی را برای سرعت باقیمانده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که رابطه نیمه تجربی لامبرت با درصد خطای میانگین ۴/۷، تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. بنابراین می‌توان از معادله نیمه تجربی لامبرت در سرعت‌های برخورد بالا استفاده کرده و سرعت باقیمانده را پیش‌بینی نمود.



شکل ۵- سرعت باقیمانده - سرعت برخورد پرتابه اجابو براساس معادله لامبرت، (۲۵) و (۲۸).

تجربی و تحلیلی این است که در روش تحلیلی موضعی بودن کامپوزیت فرض شده، در حالی که در تست تجربی به علت سرعت کم، رفتار کامپوزیت به صورت کلی می باشد.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت های بی دریغ پژوهشکده صنایع تشکر و قدردانی می نمایند.

۶- فهرست علائم و نمادها

σ_n	فشار متوسط وارده به پرتابه از هدف
σ_e, A	حد الاستیک خطی فشاری در جهت ضخامت کامپوزیت
ρ_t	چگالی کامپوزیت
V_s	سرعت اولیه برخورد پرتابه
β	ثابت تجربی
μ	ضریب اصطکاک
m	جرم پرتابه
d	قطر پرتابه
a	شعاع پرتابه
T	ضخامت هدف
V_r	سرعت باقیمانده
V_{bl}	سرعت حد بالستیک
s	شعاع دماغه اجایو
ψ	شعاع سر کالیبر
φ_0	زاویه ی اولیه اجایو
σ_{ogive}	تنش در دماغه اجایو
F_z	نیروی مقاومتی در برابر پرتابه

مراجع

- [1] Wen, H. M. "Predicting the Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Projectiles with Different Nose Shapes"; Compos Struct. 2000, 49, 321-329.
- [2] He, T.; Wen, H. M.; Qin, Y. "Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Transversely by Conical-Nosed Projectiles"; Compos Struct. 2007, 81, 243-252.
- [3] Ulven, C.; Vaidya, U.K.; Hosur, M.V. "Effect of Projectile Shape during Ballistic Perforation of VARTM Carbon/Epoxy Composite Panels"; Compos Struct. 2003, 61, 143-150.
- [4] Naik, N. K.; Shrirao, P. "Composite Structures under Ballistic Impact"; Compos Struct. 2004, 66, 579-590.
- [5] Lopez-Puente, J.; Zaera, R.; Navarro, C. "An Analytical Model for High Velocity Impacts on Thin CFRPs Woven Laminated Plates"; Int. J. Solids Struct. 2007, 44, 2837-2851.
- [6] Ganesh Babu, M.; Velmurugan, R.; Gupta, N. K. "Energy Absorption and Ballistic Limit of Targets Struck by Heavy Projectile"; Lat Am J. Solids Stru. 2006, 3, 21-39.
- [7] Cantwell, W. J. "Geometrical Effects in the Low Velocity Impact

جدول ۲- نتایج سرعت باقیمانده برای نتایج تجربی و معادلات نیمه تجربی.

سرعت باقیمانده (m/s)				سرعت برخورد (m/s)
معادله (۲۸)	معادله (۲۵)	معادله لامبرت	تجربی	
۷۸/۸۳	۸۳/۳۲	۸۰/۲۵	۸۴/۳۴۸	۹۱/۷۷۵
۷۵/۵۲	۷۶/۶۵	۷۴/۳۵	۷۱/۰۳۸	۸۶/۲۳
۵۵	۵۸/۱۳	۵۶/۵	۵۲/۹۷۴	۷۰/۴۴
	-	-	-	۳۲
	-	-	-	۳۹/۳۴

جدول ۳- مشخصات پرتابه اجایو و هدف کامپوزیت کربن/اپوکسی.

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
حد الاستیک فشاری در جهت ضخامت		MPa	۳۵
چگالی			۱۵۷۸
ضخامت	T	mm	۲/۵
نوع دماغه		-	اجایو
جرم	m	gr	۹/۵۳
قطر	d	mm	۸/۶۹
شعاع سر کالیبر	ψ	-	۱/۷۲۶

جدول ۴- مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی برای پرتابه اجایو و هدف کامپوزیت کربن/اپوکسی.

سرعت برخورد (m/s)	سرعت باقیمانده تجربی (m/s)	سرعت باقیمانده تحلیلی جدید (m/s) براساس معادله (۱۸)	درصد خطا
۹۱/۷۷۵	۸۶/۳۴۸	۸۰/۷۶	۶/۴۷
۸۶/۲۳	۷۱/۰۳۸	۷۴/۳	۴/۶
۷۰/۴۴	۵۲/۹۷۴	۵۶/۵	۶/۶۵
سرعت برخورد (m/s)	سرعت حد بالستیک تجربی (m/s)	سرعت حد بالستیک تحلیلی (m/s) براساس معادله (۲۰)	درصد خطا
۳۹/۳۴	۳۶	۳۶	۸/۵

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل تحلیلی جدید برای نفوذ کامل پرتابه های اجایو و نیمکره ای ارائه شد. در این مدل با استفاده از قانون دوم نیوتن، سرعت باقیمانده و سرعت حد بالستیک با فرض عدم وجود اصطکاک تعیین شد. تست نفوذ برای پرتابه با دماغه اجایو و هدف کامپوزیتی کربن/اپوکسی انجام شد. با استفاده از نتایج تست تجربی، یک معادله جدید برای ثابت تجربی β تعیین شد. معادله نیمه تجربی لامبرت با درصد خطای ۴/۷، می تواند برای نتایج تجربی مورد استفاده واقع شود. نتایج تحلیلی جدید با نتایج تجربی مقایسه گردید. خطای سرعت حد بالستیک در روش تحلیلی جدید ۸/۵ درصد بود که حدود ۵ درصد خطا نسبت به مدل تحلیلی ون کمتر است. علت اصلی خطا بین نتایج

- [12] Morye, S. S.; Hine, P. J.; Duckett, R. A.; Cam, D. J.; Ward, I. M. "Modeling of the Energy Absorption by Polymer Composites upon Ballistic Impact"; *Compos Sci. Tech.* 2000, 60, 2631-2642.
- [13] Gu, B. "Analytical Modeling for the Ballistic Perforation of Planar Plain-Woven Fabric Target by Projectile"; *Compos Part B-Eng.* 2003, 34, 361-371.
- [14] Abrate, S. "Ballistic Impact on Composites"; 16th Int. Conf. on Composite Materials, 2007.
- [15] Zukas, J. A.; Nicholas, T.; Swift, H. F.; Greszczuk, L. B.; Curran, D. R. "Impact Dynamics"; Wiley-Interscience: New York, 1982.
- [16] Young, C. W. "Depth Prediction for Earth-Penetrating Projectiles"; *J. Soil Mech. Found.* 1969, 95, 803-817.
- Response of GFRP"; *Compos Sci. Tech.* 2007, 67, 1900-1908.
- [8] Cantwell, W. J. "The Influence of Fiber Stacking Sequence on the High Velocity Impact Response of CFRP"; *J. Mater. Sci. Lett.* 1988, 7, 756-758.
- [9] Zhao, G.; Wang, Z.; Zhang, J.; Cho, C. "An Experimental Investigation of Penetration Failure Modes in Composite Laminates"; in the Proceedings of the 16th Int. Conf. on Composite Materials, Kyoto, Japan. July 8-13, 2007.
- [10] Hazell, P. J.; Kister, G.; Stennett, C.; Bourque, P.; Cooper, G. "Normal and Oblique Penetration of Woven CFRP Laminates by a High Velocity Steel Sphere"; *Compos Part A-Appl S.* 2008, 39, 866-874.
- [11] Morye, S. S. "High Performance Polymer Composites for Ballistic Protection"; PhD Thesis, The Univ. of Leeds, November 1998.