



تحلیل تئوری فرایند نفوذ پرتابه‌های سرتخت در مواد مرکب شیشه/اپوکسی

محمدحسین پل^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، مجتبی صدیقی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۱-۱۴۱۱۵، ghlia530@modares.ac.ir

چکیده- در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای تحلیل فرایند نفوذ پرتابه‌های سرتخت در مواد مرکب چندلایه شیشه/اپوکسی، بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای بسیار کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط هدف در طی هر جزء تا انتهای فرایند برخورد، ارائه گردیده است. مولفه‌های اصلی جذب انرژی در نظر گرفته شده در این تحلیل عبارت‌اند از: انرژی جنبشی مخروط ایجاد شده در پشت هدف، انرژی تغییر شکل الیاف ثانویه، انرژی کشش و یا شکست کششی الیاف اولیه، انرژی لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب و انرژی ترک خوردگی ماتریس. در مدل تحلیلی ارائه شده، یک فرمول تحلیلی برای محاسبه انرژی جذب شده توسط هر مکانیزم در هر جزء زمانی از فرایند نفوذ ارائه می‌گردد. در این تحلیل، پرتابه سرتخت و الیاف شیشه دارای بافت دوبعدی فرض می‌شود. در نهایت، با مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده و نتایج تجربی محققان دیگر، هم‌خوانی نسبتاً خوبی مشاهده می‌شود.

کلیدواژگان: الیاف شیشه با بافت دوبعدی، مواد مرکب، نفوذ پرتابه‌های سرتخت، حد بالستیک

Analytical modeling of perforation of projectiles into glass/epoxy composites

M. H. Pol¹, G. H. Liaght^{2*}, M. Sedighi³

1- PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran

* P. O. B. 14115-141 Tehran, ghlia530@modares.ac.ir

Abstract- In this paper an analytical model for investigating of the ballistic impact behavior of two dimensional woven E-glass/epoxy composites is presented on the basis dividing the impact duration to several time intervals and calculating the energy absorbed during each time interval. The major components of energy lost by projectile during ballistic impact are identified, namely the cone kinetic energy formed on the back face of the target, the secondary yarns deformation energy, the tensile failure energy of primary yarns, the delamination and matrix cracking energy. It is assumed that the shear plug formation is not observed for glass reinforced composites and the energy lost in overcoming the frictional force between projectile and composite is negligible. Analytical formulations have been presented for calculating energy absorbed by each mechanism in each time interval. Finally, a good correlation has been observed, comparing the analytical model presented in this paper to the experimental results presented by others investigators.

Keywords: Glass Fibres, Polymer-Matrix Composites (PMCs), Perforation of Projectile, Ballistic Limit.

۱- مقدمه

تشکیل مخروط پشت هدف و انرژی جنبشی آن، کشش (و یا شکست کششی) در الیاف اولیه، لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب، ترک ماتریس، برش پلاک و اصطکاک، و بر پایه تقسیم مدت زمان نفوذ به مولفه‌های کوچک و محاسبه انرژی جذب‌شده توسط هر یک از این مکانیزم‌ها در طول مدت هر یک از این جزءهای زمانی می‌باشد.

در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای آنالیز برخورد بالستیک مواد مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی تحت برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای سرتخت ارائه گردیده است. تحلیل بر پایه روش انرژی و تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک و محاسبه انرژی جذب‌شده توسط مکانیزم‌های مختلف در هر فاصله زمانی انجام می‌گردد. در نهایت نتایج به‌دست آمده توسط این مدل با نتایج تجربی ارائه‌شده توسط محققان دیگر مقایسه می‌شود.

۲- ارائه مدل

در طی فرایند نفوذ، انرژی از پرتابه به هدف منتقل می‌گردد. مکانیزم‌های در نظر گرفته شده در جذب انرژی طی فرایند نفوذ پرتابه‌های سرتخت در برخورد با اهداف ساخته‌شده از مواد مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی عبارت‌اند از: کشش و یا شکست کششی الیاف اولیه، تشکیل مخروط در پشت هدف و یا تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، انرژی جنبشی مخروط ایجادشده در پشت هدف، لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب و ترک‌خوردگی ماتریس. تحلیل بر پایه روش انرژی و تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک و محاسبه انرژی جذب‌شده توسط این مکانیزم‌ها در هر فاصله زمانی انجام می‌شود.

- فرضیات زیر جهت ارائه مدل تحلیلی در نظر گرفته می‌شود:
۱. پرتابه صلب است و در طی فرایند نفوذ بدون تغییر شکل باقی می‌ماند.
 ۲. انرژی هدررفته از پرتابه به دلیل اصطکاک بین پرتابه و هدف قابل صرف‌نظر کردن است.
 ۳. در اهداف ساخته‌شده با الیاف شیشه، که دارای کرنش شکست بالا در نرخ کرنش‌های بالا می‌باشند، برش و تشکیل پلاک دیده نمی‌شود [۶].
- ژو و همکارانش [۳] و همچنین موریه و همکارانش [۵] نشان دادند که طی برخورد بالستیک پرتابه‌های سرتخت استوانه‌ای

مواد مرکب برای به‌دست آوردن خواص ترمومکانیکی و ویژگی‌های منحصربه‌فردی که با مواد سنتی قابل حصول نیست طراحی و ساخته می‌شوند. همچنین، به دلیل احتیاج به مواد سبک با مقاومت ویژه (مقاومت/وزن) و سفتی ویژه (سفتی/وزن) بالا، برای کاربردهای سازه‌ای و برای استفاده در کاربردهایی با کارایی بالا مثل ماشین‌های پرنده و برای حفاظت تجهیزات و انسان در برابر بارگذاری ضربه‌ای، استفاده از این مواد امروزه افزایش چشمگیری یافته است.

معمولاً یکی از کاربردهای مهم مواد مرکب حفاظت اشخاص در برابر تهدیدهای بالستیکی با به‌کارگیری الیاف شیشه و یا الیاف مصنوعی به همراه رزین اپوکسی معرفی می‌گردد [۱]. برای درک بهتر فرایند نفوذ پرتابه‌ها در مواد مرکب در سرعت‌های بالا، تحقیقات تجربی و تحلیلی زیادی تاکنون انجام شده است. در این تحقیقات، مکانیزم‌های جذب انرژی مختلفی همچون شکست کششی الیاف، تغییر شکل الیاف ثانویه، انرژی جنبشی مخروط تشکیل‌شده در پشت صفحه هدف، لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب، ترک‌خوردن ماتریس، برش پلاک و اصطکاک در طی فرایند نفوذ معرفی می‌گردند. در این میان کانتول و مورتون [۲] نتیجه گرفتند که انرژی جذب‌شده توسط شکست کششی الیاف اولیه در مواد مرکب ساخته‌شده با الیاف شیشه و کربن دارای اهمیت کمتری نسبت به انرژی جذب‌شده توسط الیاف ثانویه دارد. در حالی که ژو و همکارانش [۳] و همچنین زی و هسیه [۴] اهمیت این مکانیزم جذب انرژی را برای مواد مرکب ساخته‌شده با الیاف ترموپلاستیک نشان دادند.

موریه و همکارانش [۵] به طور تحلیلی و تجربی انرژی جذب‌شده توسط مواد مرکب پلیمری بر اثر برخورد بالستیک را بررسی کردند. آن‌ها سه مکانیزم مهم در جذب انرژی پرتابه توسط اهداف ساخته‌شده از مواد مرکب شامل انرژی جذب‌شده توسط شکست کششی الیاف اولیه، انرژی جذب‌شده توسط تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه و انرژی جنبشی منتقل‌شده به مخروط تشکیل‌شده در پشت هدف را در نظر گرفتند.

نیک و همکارانش [۶] یک مدل تحلیلی برای تحلیل فرایند برخورد بالستیک با محاسبه مولفه‌های مهم جذب انرژی پرتابه که بیشتر توسط محققان دیگر معرفی شده بود، ارائه دادند. تحلیل آن‌ها با در نظر گرفتن مولفه‌های جذب انرژی همچون

کرنش در تارهای نزدیک به قاعده مخروط تشکیل شده، یعنی نقطه A ، همان مقدار کرنش در تار اولیه بوده و در انتهای قاعده مخروط یعنی نقطه B برابر صفر است (شکل ۱).

در طی فرایند نفوذ، قبل از اینکه لایه‌ای شکسته شود، خرابی ترکیبی از ترک خوردگی ماتریس و لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب است. شروع و رشد لایه‌لایه‌ای شدن در راستای تار و پود بیش از راستاهای دیگر است. به همین دلیل، ناحیه لایه‌لایه‌ای شدن، به جای دایره‌ای بودن، معمولاً گلبه‌گشک است [۷].

در مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله، مولد ایجاد شده در پشت صفحه هدف و تغییرات کرنش در راستای ضخامت خطی فرض می‌شود. کرنش در لایه بالایی حداکثر و در لایه پایینی حداقل بوده و با شیب ثابت در طول ضخامت تغییر می‌کند.

۳- مدل تحلیلی

انرژی جنبشی پرتابه برابر است با:

$$KE = \frac{1}{2} mV_0^2 \quad (1)$$

کاهش انرژی پرتابه بر اثر برخورد برابر است با:

$$E_L = \frac{1}{2} m(V_0^2 - V_r^2) \quad (2)$$

بنابراین، در حد بالستیک، انرژی لازم برای نفوذ برابر است با:

$$E_L = \frac{1}{2} mV_b^2 \quad (3)$$

در تحلیل فرایند نفوذ، مدت زمان تماس (نفوذ) را می‌توان به تعداد محدودی جزء و یا فاصله زمانی با مدت زمان بسیار کوچک Δt تقسیم کرد. کل انرژی جذب شده توسط صفحه هدف یا کاهش انرژی پرتابه در انتهای فاصله زمانی i برابر است با:

$$E_{Li} = E_{Ci} + E_{Si} + E_{Pi} + E_{Di} + E_{Mi} \quad (4)$$

فرضیات زیر برای محاسبه کاهش انرژی پرتابه توسط مکانیزم‌های مختلف در مدل تحلیلی در نظر گرفته می‌شود:

۱. سرعت پرتابه در هر فاصله زمانی ثابت و برابر با سرعت در

انتهای فاصله زمانی قبلی است. در اولین فاصله زمانی،

سرعت پرتابه برابر با سرعت اولیه پرتابه فرض می‌شود.

۲. الیاف در هر لایه جداگانه عمل می‌کنند.

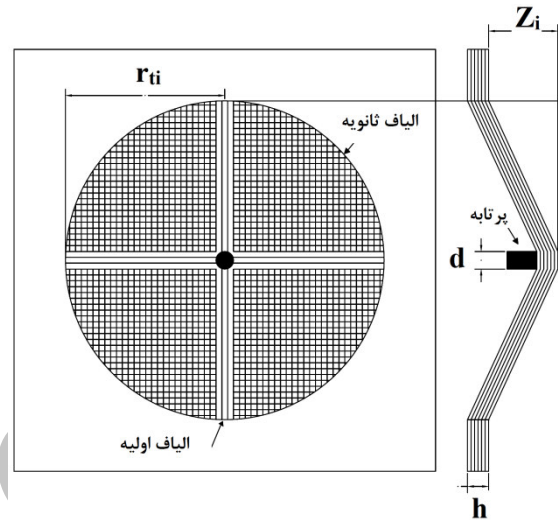
۳. انرژی جذب شده به واسطه تارهای اولیه و تغییر شکل

تارهای ثانویه مجزا و غیر وابسته هستند.

۴. هر یک از لایه‌ها جداگانه عمل می‌کنند. یک لایه زمانی

شکسته می‌شود که تمامی الیاف اولیه آن شکسته شوند.

در اهداف ساخته شده از الیاف شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی در پشت صفحه هدف یک مخروط تشکیل می‌شود. مولد این مخروط معمولاً خط مستقیم و یا یک منحنی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ یک طرح شماتیک از مخروط ایجاد شده در پشت هدف را با فرض مولد خطی، همان‌طور که در مدلسازی حاضر در نظر گرفته می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل ۱ مخروط تشکیل شده در پشت صفحه هدف در طی فرایند نفوذ

الیاف اولیه، الیافی که دقیقاً در زیر پرتابه هستند، نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه را ایجاد می‌کنند. شکست تمامی الیاف اولیه به منزله نفوذ کامل پرتابه در هدف است. این الیاف دارای کرنش متفاوتی بوده و زمانی شکسته می‌شوند که کرنش درون آن‌ها از کرنش شکست این الیاف در نرخ کرنش بالا تجاوز کند. در طول تار اولیه میانی در هر لایه، به دلیل تماس این تار با وسط سر پرتابه (با طولی برابر با قطر پرتابه)، کرنش کششی حداکثر است، در حالی که تارهای اولیه دیگر، به دلیل اینکه با نقاط دیگر سر پرتابه (با طول‌هایی کمتر از قطر پرتابه) در تماس می‌باشند، دارای کرنش کمتری هستند. تغییرات کرنش در راستای ضخامت هدف نیز ثابت [۵] و یا خطی [۶] در نظر گرفته می‌شود و شعاع قاعده مخروط تشکیل شده در پشت صفحه هدف بر پایه گسترش موج عرضی محاسبه می‌گردد.

به استثنای تارهای اولیه، تمامی تارهایی که در طی فرایند نفوذ تغییر شکل می‌دهند، تارهای ثانویه، مقداری از انرژی پرتابه را در طی تغییر شکل جذب می‌کنند. مقدار جذب انرژی توسط این تارها به توزیع کرنش درون آن‌ها وابسته است.

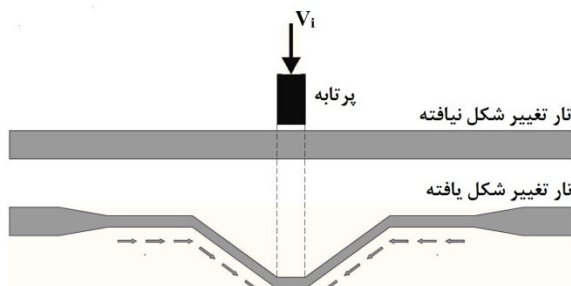
هنگامی که جبهه موج کرنشی از یک نقطه تار عبور می‌کند، ماده تار از خارج به سمت محل برخورد حرکت می‌کند (شکل ۲) و تار در پشت موج پلاستیک شبیه یک خیمه وارونه (مخروط) با راسی در نقطه برخورد شکل داده می‌شود. قاعده این خیمه یا مخروط به سمت بیرون نقطه برخورد با سرعتی برابر با سرعت موج عرضی گسترش می‌یابد. این سرعت برابر است با [۸]:

$$c_t = \sqrt{\frac{(1 + \varepsilon_p)\sigma_p}{\rho}} - \int_0^{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)} d\varepsilon \quad (10)$$

در فاصله زمانی i فاصله طی شده توسط موج عرضی و موج پلاستیک برابرند با:

$$r_{ti} = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{tn} \Delta t \quad (11)$$

$$r_{pi} = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{pn} \Delta t \quad (12)$$



شکل ۲ شکل یک تار اولیه قبل و بعد از برخورد

در هر لایه، تنش در نقطه برخورد حداکثر است و در طول تار کاهش می‌یابد. مقدار کرنش در طول تار را می‌توان با یک تابع نمایی تخمین زد [۶]:

$$\varepsilon_{py} = \varepsilon_0 b^{x/a} \quad (13)$$

که در آن b یک ثابت کوچک‌تر از ۱ و a عرض تار است. در فاصله زمانی i کرنش در نقطه برخورد برابر است با [۶]:

$$\varepsilon'_{0i} = \left\{ \frac{\frac{d}{2} + \sqrt{\left(r_{ti} - \frac{d}{2}\right)^2 + Z_i^2} + (r_{pi} - r_{ti}) - r_{pi}}{b^{r_{pi}/a} - 1} \right\} \quad (14)$$

۵. بعد از شکست یک لایه، انرژی جذب‌شده توسط شکست کششی الیاف اولیه، لایه‌لایه‌ای شدن و ترک‌خوردگی ماتریس و همچنین شعاع ناحیه لایه‌لایه‌ای شدن و ترک‌خوردگی ماتریس آن لایه ثابت فرض می‌شود. سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی i برابر است با:

$$V_{i+1} = \sqrt{V_0^2 - \frac{2}{m} E_{Li}} \quad (5)$$

فاصله طی شده توسط پرتابه و راس خیمه وارونه (نوک مخروط ایجاد شده در پشت صفحه هدف) برابر بوده و در انتهای i امین فاصله زمانی برابر است با:

$$Z_i = \sum_{n=1}^{n=i} \Delta Z_n \quad (6)$$

که در آن:

$$\Delta Z_n = V_n \cdot \Delta t \quad (7)$$

در اولین فاصله زمانی، سرعت پرتابه با سرعت اولیه پرتابه برابر است و انرژی پرتابه برابر با انرژی اولیه پرتابه است. بعد از آن، این انرژی به انرژی جنبشی پرتابه و انرژی جنبشی مخروط ایجادشده در پشت هدف و انرژی‌های جذب‌شده توسط مکانیزم‌های مختلف تقسیم می‌شود. با افزایش فاصله‌های زمانی و محاسبه انرژی جذب‌شده از پرتابه توسط مکانیزم‌های مختلف در تمامی فاصله‌های زمانی، انرژی پرتابه و سرعت آن در ابتدای فاصله زمانی بعد محاسبه می‌شود. این فرایند تا زمانی که تمامی الیاف اولیه در تمانی لایه‌ها شکسته شوند و یا سرعت باقی‌مانده پرتابه در انتهای فاصله زمانی i فرایند صفر گردد، تکرار می‌شود.

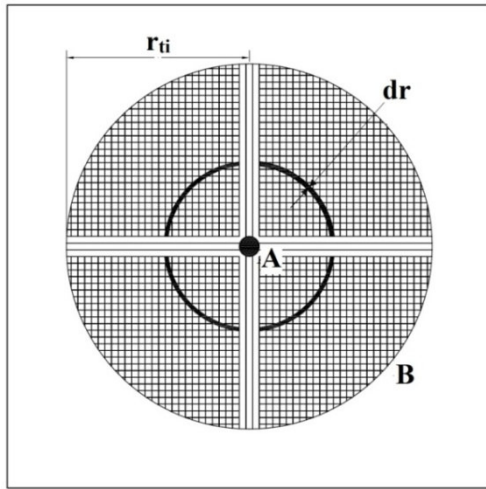
۴- فرمول‌بندی برای کامپوزیت بافته‌شده

۴-۱- انرژی جذب‌شده توسط کشش در الیاف اولیه

سرعت گسترش موج الاستیک و موج پلاستیک به ترتیب برابرند با [۸]:

$$c_e = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)_{\varepsilon=0}} \quad (8)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)_{\varepsilon=\varepsilon_p}} \quad (9)$$



شکل ۳ المان حلقوی در نظر گرفته شده برای محاسبه انرژی جذب شده توسط تغییر شکل الیاف ثانویه

۳-۴- ترک خوردگی ماتریس و انرژی جذب شده توسط لایه لایه‌ای شدن و

در طی فرایند نفوذ، قبل از شکست یک لایه، خرابی لایه‌لایه‌ای شدن و ترک خوردگی ماتریس در آن لایه و در اطراف نقطه برخورد و در جایی که کرنش از کرنش شروع خرابی ماده تجاوز کند، رخ خواهد داد. کرنش شروع خرابی تحت بارگذاری کششی ۴۰ درصد کرنش شکست نهایی در نظر گرفته می‌شود [۶]. خرابی لایه‌لایه‌ای شدن و ترک خوردگی ماتریس، بخشی از انرژی اولیه پرتابه را جذب می‌کند. انرژی جذب شده توسط این مکانیزم‌ها خیلی کمتر از انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های دیگر جذب انرژی همانند تغییر شکل الیاف ثانویه، کشش تارهای اولیه و انرژی جنبشی مخروط ایجاد شده است، به طوری که موریه و همکارانش [۵] از آن‌ها صرف نظر می‌کنند. رشد لایه‌لایه‌ای شدن در مد دوم شکست رخ می‌دهد. مطالعات [۹،۷] بر روی شروع و گسترش لایه‌لایه‌ای شدن در اهداف ساخته شده از مواد مرکب بافته شده نشان می‌دهند که گسترش خرابی لایه‌لایه‌ای شدن در امتداد تار و پود ماده مرکب بیشتر از جهات دیگر می‌باشد. در نتیجه ناحیه خرابی بیش از اینکه به شکل دایره باشد به صورت گلبرگی است. در صورتی که مساحت ناحیه لایه‌لایه‌ای شدن C_1 برابر مساحت دایره متناظر با آن در نظر گرفته شود، انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های خرابی لایه‌لایه‌ای شدن و ترک خوردگی ماتریس در فاصله زمانی t برابرند با:

به دلیل فشرده شدن لایه‌های بالایی در زمان تشکیل مخروط پستی، کرنش در لایه‌های بالایی بیش از لایه‌های پایینی است. در این مقاله، فرض می‌شود که این کرنش در لایه بالایی حداکثر و در لایه پایینی حداقل است و با شیب ثابت در طول ضخامت تغییر می‌کند.

انرژی جذب شده توسط کشش تارهای اولیه برابر است با:

$$E_{pi} = A \int_0^{r_{pi}} \left(\int_0^{\varepsilon_{0i} b^{x/a}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \quad (15)$$

به دلیل اینکه طول تار دو برابر مسافت طی شده توسط موج طولی بوده و الیاف دارای بافت دوبعدی است، عبارت بالا بایستی در ضریب چهار ضرب گردد.

۲-۴- انرژی جذب شده توسط تغییر شکل الیاف ثانویه

تارهای ثانویه متناسب با موقعیتشان کرنش متفاوتی را تحمل می‌کنند. الیاف مجاور نقطه برخورد کرنشی برابر با کرنش در نقطه مجاور خود بر روی تار اولیه تحمل می‌کنند، در حالی که تارهای دور از نقطه برخورد کرنش کمتری متحمل می‌شوند. در صورتی که تغییرات کرنش از نقطه A تا B خطی فرض شود، شرایط مرزی زیر را برای تغییرات کرنش با فاصله از محل برخورد در فاصله زمانی t خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sy} &= \varepsilon_{py} \quad \text{at} \quad r = d/2 \quad (\text{نقطه } A) \\ \varepsilon_{sy} &= 0 \quad \text{at} \quad r = r_{ti} \quad (\text{نقطه } B) \end{aligned} \quad (16)$$

در این صورت، کرنش در سرتاسر منطقه مخروط ایجاد شده و درون الیاف ثانویه برابر است با:

$$\varepsilon_{syt} = \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} \varepsilon_{pyt} \quad (17)$$

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، با در نظر گرفتن یک المان حلقه‌ای با شعاع داخلی و بیرونی r و $r+dr$ حجم dV برابر است با:

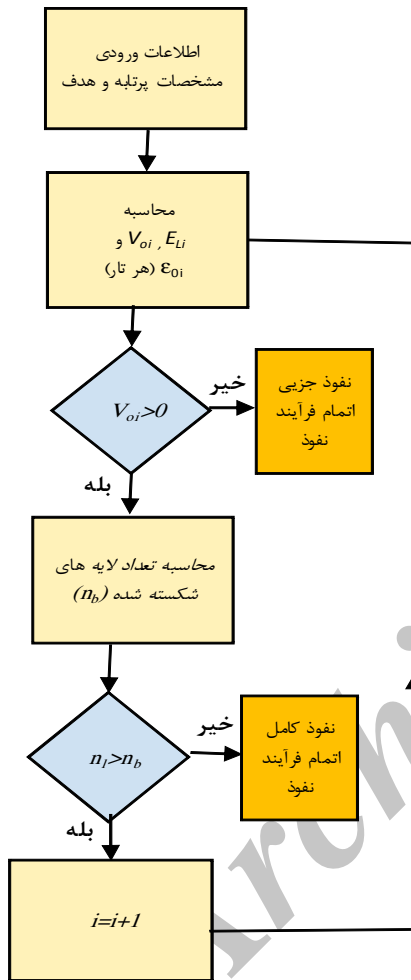
$$dV = h \left(2\pi r - 8r \sin^{-1} \frac{d}{2r} \right) dr \quad (18)$$

بنابراین انرژی جذب شده در تغییر شکل الیاف ثانویه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$(19)$$

۵- نتایج و بحث

نتایج مدل تحلیلی ارائه‌شده در اینجا با نتایج به‌دست آمده از نتایج تجربی ارائه‌شده توسط محققان دیگر [۱۰، ۶]، در تخمین حد بالستیک، با استفاده از روندنما محاسباتی شکل ۴ در جدول ۱ مقایسه شده است.



شکل ۴ روندنما محاسباتی تئوری ارائه‌شده

جدول ۱ مقایسه نتایج حاصل از تئوری و نتایج تجربی محققان دیگر

| مرجع | حد بالستیک تجربی (m/s) | حد بالستیک تئوری (m/s) | ضخامت هدف (mm) | قطر پرتابه (mm) | جرم پرتابه (gr) |
|------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| [۶] | ۱۵۰ | ۱۵۲/۵ | ۲ | ۵ | ۲/۸ |
| [۱۰] | ۱۷۵ | ۱۷۱ | ۴/۵ | ۴/۷۶ | ۳/۳۳ |
| [۱۰] | ۲۱۰ | ۲۰۲/۵ | ۴/۵ | ۶/۳۵ | ۳/۸۴ |

$$E_{Di} = (c_1 \pi r_{di}^2) G_{II} \quad (20)$$

$$E_{Mi} = (c_1 \pi r_{di}^2) h_1 V_m E_m \quad (21)$$

پس از شکست لایه، فرض می‌شود انرژی جذب‌شده توسط این دو مکانیزم ثابت باقی خواهد ماند.

۴-۴- انرژی جذب‌شده توسط انتقال انرژی جنبشی به

مخروط ایجادشده در پشت هدف

در طی فرایند نفوذ، تغییر شکل مخروطی در پشت صفحه هدف رخ می‌دهد که مقداری از انرژی پرتابه را جذب می‌کند. در تئوری‌های ارائه‌شده توسط محققان دیگر [۹، ۷] فرض می‌شود تمامی نقاط این مخروط ایجادشده دارای سرعت یکسانی هستند. در حالی که با فرض داشتن مولد خطی برای مخروط ایجادشده در پشت هدف (شکل ۱) این نقاط دارای سرعت مختلفی با تغییرات خطی هستند. این فرض شرایط مرزی زیر را برای تغییرات سرعت نسبت به فاصله نقطه از محل برخورد در فاصله زمانی i ایجاد می‌کند:

$$\begin{aligned} V_c &= V_i \quad \text{at} \quad r \leq d/2 \\ V_c &= 0 \quad \text{at} \quad r = r_{ti} \end{aligned} \quad (22)$$

با در نظر گرفتن یک تغییر خطی در سرعت از نقطه A تا نقطه B در فاصله زمانی i ، تغییرات سرعت مخروط ایجادشده را می‌توان با معادله زیر محاسبه کرد:

$$V_{ci} = \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} V_i \quad (23)$$

با در نظر گرفتن یک المان دایره‌ای از مخروط ایجادشده از نقطه A تا B (شکل ۳)، با شعاع‌های داخلی و خارجی r و $r+dr$ جرم این المان و انرژی جنبشی مخروط ایجادشده را در فاصله زمانی i می‌توان از معادله زیر به‌دست آورد:

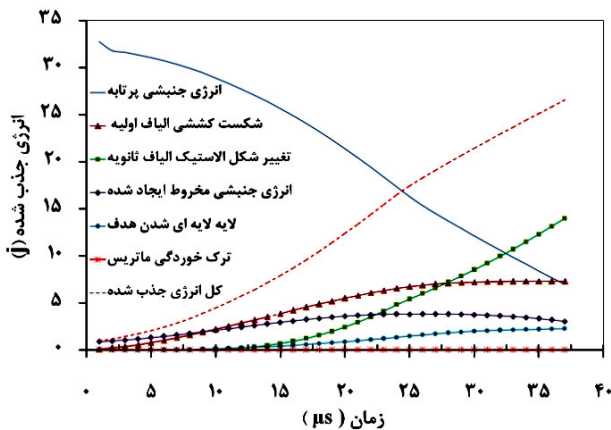
$$dm = h(2\pi r)\rho dr \quad (24)$$

$$\begin{aligned} E_{Ci} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d^2}{4} \rho h \right) V_i^2 \\ &+ \int_{d/2}^{r_{ti}} \frac{1}{2} (2\pi h r) \left(\frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} \right)^2 dr \end{aligned} \quad (25)$$

و یا:

$$\begin{aligned} E_{Ci} &= \frac{\pi \rho h d^2 V_i^2}{8} + \frac{\pi \rho h V_i^2}{(2r_{ti} - d)^2} \\ &\left(\frac{1}{3} r_{ti}^4 - \frac{1}{2} r_{ti}^2 d^2 + \frac{1}{3} r_{ti} d^3 - \frac{1}{16} d^4 \right) \end{aligned} \quad (26)$$

در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک، به دلیل اینکه با افزایش سرعت اختلاف میان انرژی اولیه پرتابه و انرژی جذب شده با شیب تند افزایش می‌یابد [۱۱] و انرژی جذب شده کسر کمی از انرژی برخورد خواهد بود، دقت سرعت خروجی محاسبه شده نمی‌تواند گویای دقت تئوری ارائه شده باشد. به همین دلیل، مقایسه نتایج حاصل از تئوری ارائه شده و نتایج تجربی در حد بالستیک، که معمولاً بیشترین خطا را خواهد داشت، صورت می‌گیرد.



شکل ۵ انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف ($V_i=153\text{m/s}$)

سرعت مخروط ایجاد شده در پشت هدف در ابتدا صفر بوده و با افزایش زمان افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر شعاع قاعده مخروط ایجاد شده و به تبع آن جرم، آن با افزایش زمان و مقدار نفوذ، افزایش می‌یابد. انرژی جذب شده توسط لایه‌های شدن صفحات هدف و به‌ویژه ترک خوردگی ماتریس، همان‌طور که انتظار می‌رفت، بسیار کم بوده و قابل صرف نظر کردن می‌باشند. در انتهای فرایند نفوذ، انرژی جذب شده از پرتابه توسط مکانیزم‌های انرژی جنبشی مخروط، تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، شکست کششی الیاف اولیه، لایه‌های شدن صفحات هدف و ترک خوردگی ماتریس به ترتیب $11/36$ ، $52/63$ ، $27/49$ ، $8/52$ و $0/01$ درصد از کل انرژی جذب شده می‌باشد. زمانی که کرنش الیاف اولیه از کرنش مجاز نهایی تجاوز کند، این الیاف شکسته می‌شوند. شکست یک لایه زمانی اتفاق می‌افتد که تمامی الیاف اولیه آن لایه شکسته شوند و زمانی که تمامی لایه‌های کامپوزیت شکسته شود، نفوذ کامل اتفاق خواهد افتاد. فرایند نفوذ زمانی به پایان می‌رسد که نفوذ کامل اتفاق بیافتد و یا سرعت پرتابه در حین نفوذ صفر گردد.

تغییرات سرعت پرتابه، حداکثر کرنش در وسط تار در لایه بالایی و حداکثر کرنش در گوشه تار در لایه پایینی در طی فرایند نفوذ در شکل ۶ نشان داده شده است.

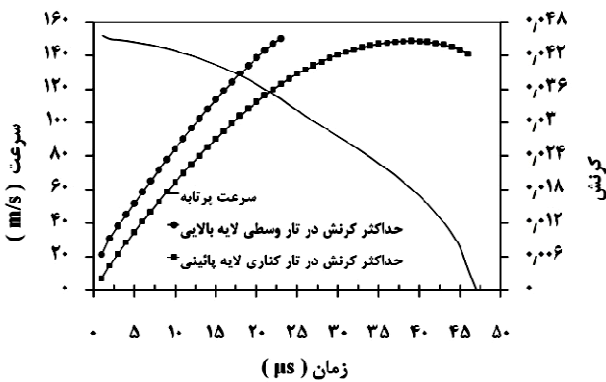
جهت تحلیل بیشتر فرایند نفوذ، نتایج به دست آمده از تئوری ارائه شده در این مقاله با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۶] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف از جنس ماده مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی با مشخصات داده شده در جدول ۲ بوده و حد بالستیک اندازه‌گیری شده آن $V_b=150\text{m/s}$ است. با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده در این تحقیق، حد بالستیک $V_b=152/5\text{m/s}$ به دست می‌آید.

جدول ۲ خواص لازم اندازه‌گیری شده پرتابه و هدف برای مدل تحلیلی [۶]

| مشخصات پرتابه | |
|----------------------------|------------------------------|
| Flat ended | شکل |
| $M_p=2/8\text{gr}$ | جرم |
| $d=5\text{mm}$ | قطر |
| مشخصات هدف | |
| 2D Woven Glass/ Epoxy | جنس |
| $V_f=50\%$ | درصد حجمی الیاف |
| $h=2\text{mm}$ | ضخامت |
| $N_l=6$ | تعداد لایه ها |
| $N_f=3$ | تعداد الیاف اولیه در یک لایه |
| $\rho=1750\text{kg/m}^3$ | جرم حجمی |
| $u=28\text{MJ/m}^3$ | انرژی شکست کامپوزیت |
| $E_m=0/9\text{MJ/m}^3$ | انرژی ترک خوردگی رزین |
| $G_{II}=1000\text{MJ/m}^2$ | نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی |
| $b=0/85$ | ضریب انتقال موج تنش |
| $\epsilon_d=0/4\epsilon_R$ | کرنش استانه خرابی |
| $C_I=0/9$ | ضریب کاهش سطح |

انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف در سرعت $V_b=153\text{m/s}$ در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت انرژی جنبشی اولیه پرتابه برابر با $32/77$ است. در انتهای فرایند برخورد، $18/97$ درصد از انرژی اولیه پرتابه باقی می‌ماند.

کل انرژی جذب شده را به خود اختصاص داده است. در انتهای فرایند نفوذ، انرژی جذب شده از پرتابه توسط مکانیزم‌های انرژی جنبشی مخروط، تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، شکست کششی الیاف اولیه، لایه‌لایه‌ای شدن صفحات هدف ساخته شده از مواد مرکب چندلایه‌ای و ترک خوردگی ماتریس به ترتیب $0/37$ ، $69/68$ ، $22/00$ ، $7/94$ و $0/001$ درصد از کل انرژی جذب شده می‌باشد. مشاهده می‌شود، همانند حالت قبل، انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های لایه‌لایه‌ای شدن هدف و به ویژه ترک خوردگی ماتریس بسیار کم و قابل صرف نظر کردن هستند. شکل ۸ نشان می‌دهد، به دلیل کاهش زیاد سرعت پرتابه پس از افزایش اولیه کرنش در لایه پایینی، کرنش کاهش می‌یابد.



شکل ۸ تغییرات سرعت پرتابه، حداکثر کرنش در وسط تار در لایه بالایی و حداکثر کرنش در تار کناری در لایه پایینی ($V_i=152\text{m/s}$)

۶- نتیجه‌گیری

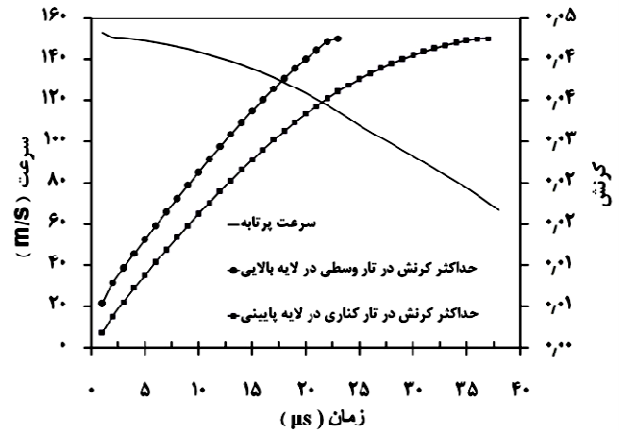
یک مدل تحلیلی بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به فواصل زمانی نفوذ کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی در هر یک از این فواصل زمانی برای نفوذ پرتابه‌های سرتخت در اهداف ساخته شده از مواد مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی ارائه گردید. نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی محققان دیگر مقایسه و هم‌خوانی نسبتاً خوبی مشاهده گردید.

۷- فهرست علائم

a عرض تار

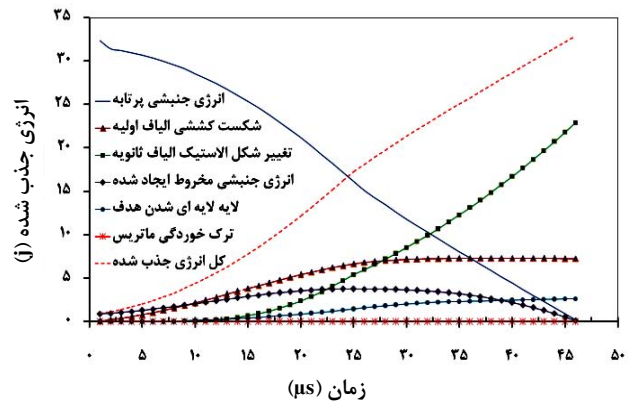
A سطح مقطع تار

ac_i شتاب پرتابه در فاصله زمانی i



شکل ۶ تغییرات سرعت پرتابه، حداکثر کرنش در وسط تار در لایه بالایی و حداکثر کرنش در تار کناری در لایه پایینی ($V_i=152\text{m/s}$)

شکل‌های ۷ و ۸ حالتی را نشان می‌دهد که سرعت برخورد مقدار خیلی کمی از حد بالستیک پایین‌تر است ($V_i=152\text{m/s}$ ، $E_i=32/35\text{J}$). در این حالت، در لایه پایینی، کرنش از مقدار کرنش نهایی، تنها در بعضی از الیاف اولیه، تجاوز خواهد کرد؛ به عبارتی دیگر، تا انتهای فرایند نفوذ و رسیدن سرعت پرتابه به صفر، بعضی از الیاف اولیه شکسته نخواهند شد و تنها نفوذ جزئی اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۷ انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف ($V_i=152\text{m/s}$)

همانند حالت قبل، بیشترین انرژی جذب شده مربوط به مکانیزم تغییر شکل الیاف ثانویه است، ولیکن در انتهای فرایند برخورد، انرژی جنبشی مخروط ایجاد شده، برخلاف حالت قبل، به دلیل اینکه سرعت نهایی پرتابه صفر می‌شود، کسر کوچکی از کل انرژی جذب شده می‌باشد (شکل ۷). همچنین، مشاهده می‌شود مکانیزم شکست کششی الیاف اولیه درصد بالاتری از

| | |
|------------------------------------|-------------------------|
| ϵ_{py} کرنش در تار اولیه | b ضریب انتقال موج تنش |
| ϵ_{sy} کرنش در تار ثانویه | c_1 ضریب کاهش سطح |
| σ تنش | c_e سرعت موج الاستیک |
| σ_p تنش پلاستیک | c_p سرعت موج پلاستیک |
| ρ چگالی هدف | c_t سرعت موج عرضی |

 d قطر پرتابه

۸- مراجع

1. Laible R. C., Editor, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Amsterdam, Elsevier, 1980, p. 9.
2. Cantwell W. J., Morton J., "Impact Perforation of Carbon Fibre Rein-Forced", *Composites Science and Technology*, Vol. 38, No. 2, 1990, pp. 119-141.
3. Zhu G., Goldsmith W., Dharan C. K., "Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles: I. Experimental Investigation", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 29, 1992, pp. 399-419.
4. Zee R. H., Hsieh C. Y., "Energy Loss Partitioning During Ballistic Impact of Polymer Composites", *Polymer Composites*, Vol. 14, No. 3, 1993, pp. 265-271.
5. 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", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 2631-2642.
6. Naik N. K., Shirrao P., Reddy B. C. K., "Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Formulation", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 10, 2006, pp. 1521-1552.
7. Wu E., Chang L., "Woven Glass/Epoxy Laminates Subject to Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, 1995, pp. 607-619.
8. Smith J. C., Mc Crackin F. L., Schiefer H. F., "Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading. Part V: Wave Propagation in Long Textile Yarns Impacted Transversely", *Textile Research Journal*, 1958, pp. 288-302.
9. Naik N. K., Satyanarayana Reddy K., "Delaminated Woven Fabric Composite Plates under Transverse Quasi-Static Loading: Experimental Studies", *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, Vol. 21, 2002, pp. 869-877.
10. Gellert E. P., Cimpoeru S. J., Woodward R. L., "A Study of the Effect of Target Thickness on the Ballistic Perforation of Glass-Fibre-Reinforced Plastic Composites", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, 2000, pp. 445-456.
11. Naik N. K., Shirrao P., Reddy B. C. K., "Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Parametric Studies", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 412, 2005, pp. 104-116.

| |
|--|
| E_{Ci} انرژی منتقل شده به مخروط در فاصله زمانی i |
| E_{Di} انرژی جذب شده به دلیل لایه‌ای شدن در فاصله زمانی i |
| E_i مدول کششی کامپوزیت |
| E_L انرژی ازدست رفته پرتابه |
| E_{Li} انرژی ازدست رفته پرتابه در انتهای فاصله زمانی i |
| E_m انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین بر واحد حجم |
| E_{Mi} انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین در انتهای فاصله زمانی i |
| E_{Pi} انرژی جذب شده توسط تارهای اولیه در انتهای فاصله زمانی i |
| E_{Si} انرژی جذب شده توسط تارهای ثانویه در انتهای فاصله زمانی i |
| F_i نیروی مقاوم در برابر حرکت پرتابه در فاصله زمانی i |
| G_{II} نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی |
| h ضخامت کامپوزیت |
| h_1 ضخامت یک لایه |
| KE انرژی جنبشی پرتابه |
| m جرم پرتابه |
| r_{di} شعاع جدایش یک لایه در فاصله زمانی i |
| r_{pi} فاصله پیموده شده توسط موج پلاستیک تا فاصله زمانی i |
| r_{ti} فاصله پیموده شده توسط موج عرضی تا فاصله زمانی i |
| V_0 سرعت اولیه پرتابه |
| V_b حد بالستیک |
| V_{ci} سرعت مخروط ایجاد شده در فاصله زمانی i |
| V_{i+1} سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی i |
| V_m درصد حجمی رزین |
| V_r سرعت باقی مانده پرتابه |
| Z_i فاصله پیموده شده توسط پرتابه تا فاصله زمانی i |
| ϵ کرنش |
| ϵ_0 کرنش حداکثر در یک تار |
| ϵ_{0i} کرنش حداکثر در یک لایه در فاصله زمانی i |
| ϵ'_{0i} کرنش حداکثر یک لایه به دلیل ایجاد مخروط در فاصله زمانی i |
| ϵ''_{0i} کرنش حداکثر در یک لایه به دلیل فشار مستقیم در لایه بالایی در فاصله زمانی i |
| ϵ_p کرنش پلاستیک |