

تاریخچه مقاله: دریافت ۹۰/۱۲/۱۹ پذیرش ۹۱/۱/۲۷ ارائه در سایت ۹۱/۳/۱۵



محمدحسين پل'، غلامحسين لياقت'\*، مجتبی صديقی ّ

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 پستی۱۴۱۱۵-۱۴۱۱۵، ghlia530@modares.ac.ir

كليدواژگان: الياف شيشه با بافت دوبعدى، مواد مركب، نفوذ پرتابههاى سرتخت، حد بالستيك

# Analytical modeling of perforation of projectiles into glass/epoxy composites

M. H. Pol<sup>1</sup>, G. H. Liaght<sup>2\*</sup>, M. Sedighi<sup>3</sup>

PhD Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
 Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
 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.

وأكثرته

#### ۱– مقدمه

مواد مرکب برای به دست آوردن خواص ترمومکانیکی و ویژگیهای منحصربه فردی که با مواد سنتی قابل حصول نیست طراحی و ساخته می شوند. 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 ضربه ای، استفاده از این مواد امروزه افزایش چشمگیری یافته است.

معمولا یکی از کاربردهای مهم مواد مرکب حفاظت اشخاص در برابر تهدیدهای بالستیکی با به کارگیری الیاف شیشه و یا الیاف مصنوعی به همراه رزین اپوکسی معرفی می گردد[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 می گردند. 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 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 جذب شده 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 منتقل شده به مخروط تشکیل شده در پشت هدف را درنظر گرفتند.

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

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 جذب شده توسط هر یک از این مکانیزمها در طول مدت هر یک از این جزءهای زمانی می باشد.

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 می گردد. مکانیزمهای درنظر گرفته شده در جذب انرژی طی فرایند نفوذ پرتابههای سرتخت در برخورد با اهداف ساخته شده از مواد مرکب شیشه *ا*پوکسی 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 ایجاد شده در پشت هدف، لایه لایه ای شدن ماده مرکب و ترک خوردگی ماتریس. تحلیل بر پایه روش انرژی و تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط این مکانیزمها در هر فاصله زمانی انجام می شود.

فرضیات زیر جهت ارائه مدل تحلیلی درنظر گرفته میشود:

- برتابه صلب است و در طی فرایند نفوذ بدون تغییر شکل باقی می ماند.
- 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 نمی شود [۶].

ژو و همکارانش[۳] و همچنین موریه و همکارانش[۵] نشان دادند که طی برخورد بالستیک پرتابههای سرتخت استوانهای

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





الیاف اولیه، الیافی که دقیقا در زیر پرتابه هستند، نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه را ایجاد می کنند. 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 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] درنظر گرفته میشود و شعاع قاعده مخروط تشکیل شده در پشت صفحه هدف بر پایه گسترش موج عرضی محاسبه می گردد.

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.

محمدحسين پل و همكاران

کرنش در تارهای نزدیک به قاعده مخروط تشکیلشده، 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 ترکخوردگی 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، معمولا گلبرگشکل است [۷].

در مدل تحلیلی ارائهشده در این مقاله، مولد ایجادشده 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:  $KE = \frac{1}{2} mV_0^2$ (1) کاهش انرژی پرتابه بر اثر برخورد برابر است با:  $E_L = \frac{1}{2} m (V_0^2 - V_r^2)$ بنابراین، در حد بالستیک، انرژی لازم برای نفوذ برابر است با:  $E_L = \frac{1}{2} m V_b^2$ در تحلیل فرایند نفوذ، مدت زمان تماس (نفوذ) را میتوان به تعداد محدودی جزء و یا فاصله زمانی با مدت زمان بسیار کوچک  $\Delta t$  تقسیم کرد. کل انرژی جذب شده توسط صفحه هدف یا کاهش انرژی پرتابه در انتهای فاصله زمانی *i* برابر است با:  $E_{Li} = E_{Ci} + E_{Si} + E_{Pi} + E_{Di} + E_{Mi}$ (۴) فرضیات زیر برای محاسبه کاهش انرژی پرتابه توسط مکانیزمهای مختلف در مدل تحلیلی درنظر 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 می شود. ۲. الیاف در هر لایه جداگانه عمل می کنند. 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 می شود که تمامی الیاف اولیه آن شکسته شوند.

۵. بعد از شکست یک لایه، انرژی جذب شده توسط شکست کششی الیاف اولیه، لایه لایه ای شدن و ترکخوردگی ماتریس و همچنین شعاع ناحیه لایه لایه ای شدن و ترکخوردگی ماتریس آن لایه ثابت فرض می شود. سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی *i* برابر است با:

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

فاصله طیشده 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:

$$Z_{i} = \sum_{n=1}^{n=i} \Delta Z_{n}$$
 (۶)  
که در آن:

$$\Delta Z_n = V_n \cdot \Delta t \tag{Y}$$

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 می شود. با افزایش فاصلههای زمانی و محاسبه انرژی جذب شده از پرتابه توسط مکانیز مهای مختلف در تمامی فاصلههای زمانی، انرژی پرتابه و سرعت آن در ابتدای فاصله زمانی بعد محاسبه می شود. 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، تكرار مىشود.

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

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

محمدحسین پل و همکاران

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 می شود. قاعده این خیمه یا مخروط به سمت بیرون نقطه برخورد با سرعتی برابر با سرعت موج عرضی گسترش مییابد. این سرعت برابر است یا [۸]:

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

در فاصله زمانی *i* فاصله طیشده توسط موج عرضی و موج پلاستیک برابرند با:

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

$$r_{pi} = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{pn} \Delta t \tag{11}$$

↓ <sup>V</sup> <sup>i</sup>	
پرتابه	تار تغییر شکل نیافته
	تار تغییر شکل یافته

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]:  

$$\varepsilon_{py} = \varepsilon_0 b^{x/a}$$
 (۱۳)  
که در آن d یک ثابت کوچکتر از ۱ و a عرض تار است. در  
که در آن d یک ثابت کوچکتر از ۱ و a عرض تار است. در  
فاصله زمانی i کرنش در نقطه برخورد برابر است با[۶]:  
 $\varepsilon'_{0i} = \begin{cases} \frac{d}{2} + \sqrt{\left(r_{ti} - \frac{d}{2}\right)^2 + Z_i^2} + (r_{pi} - r_{ti}) - r_{pi}}{b} \end{cases}$  (۱۴)

14 www.SID.ir

مهندسی مکانیک مدرس دورهٔ ۱۲ شمارهٔ ۲ تیر ۱۳۹۱

به دلیل فشردهشدن لایههای بالایی در زمان تشکیل مخروط پشتی، 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:

$$E_{Pi} = A \int_0^{r_{pi}} \left( \int_0^{\varepsilon_{0i} b^{x/a}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \tag{10}$$

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.

Y-Y- 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 کرئش 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 i خواهیم داشت:

 $\varepsilon_{sy} = \varepsilon_{py}$  at r = d/2 (A نقطه)  $\varepsilon_{sy} = 0$  at  $r = r_{ti}$  (B نقطه) (۱۶) در این صورت، کرنش در سرتاسر منطقه مخروط ایجادشده

و درون الياف ثانويه برابر است با:

$$\varepsilon_{syi} = \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} \varepsilon_{pyi} \tag{1Y}$$

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

$$dV = h \left( 2\pi r - 8r \sin^{-1} \frac{d}{2r} \right) dr \tag{11}$$

بنابراین انرژی جذبشده در تغییر شکل الیاف ثانویه را میتوان از رابطه زیر بهدست آورد:

(۱۹)

مهندسی مکانیک مدرس دورهٔ ۱۲ شمارهٔ ۲ تیر ۱۳۹۱ www.SID.ir



**شکل ۳** المان حلقوی درنظر گرفته شده برای محاسبه انرژی جذب شده توسط تغییر شکل الیاف ثانویه

# ۳-۴- انرژی جذب شده توسط لایه لایه ی شدن و ترکخوردگی ماتریس

در طی فرایند نفوذ، قبل از شکست یک لایه، خرابی لایهلایهای شدن و ترکخوردگی 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 درنظر گرفته می شود [۶]. خرابی لایه لایه شدن و ترکخوردگی ماتریس، بخشی از انرژی اولیه پرتابه را جذب میکند. انرژی جذب شده توسط این مکانیزمها خیلی کمتر از انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای ديگر جذب انرژی همانند تغيير شکل الياف ثانويه، کشش تارهای اولیه و انرژی جنبشی مخروط ایجادشده است، به طوری که موریه و همکارانش [۵] از آنها صرفنظر میکنند. رشد لایهلایهای شدن در مد دوم شکست رخ میدهد. مطالعات [۹،۷] بر روی شروع و گسترش لایه لایه ای شدن در اهداف ساختهشده از مواد مرکب بافتهشده نشان میدهند که گسترش خرابی لایه لایه ای 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 لایه لایه شدن  $c_1$  برابر مساحت دایره متناظر با آن درنظر گرفته شود، انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای خرابی i لايهلايه مدن و ترکخوردگی ماتريس در فاصله زمانی برابرند با:

$$E_{Di} = (c_1 \pi r_{di}^2) G_{II}$$
 (7.)

$$E_{Mi} = (c_1 \pi r_{di}^2) h_1 V_m E_m$$
 (71)

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 می هد که مقداری از انرژی پرتابه را جذب می کند. در تئوری های ارائه شده توسط محققان دیگر [۹،۷] فرض می شود تمامی نقاط این مخروط ایجاد شده دارای سرعت یکسانی هستند. در حالی که با فرض داشتن مولد خطی برای مخروط ایجاد شده 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 می کند:

$$V_c = V_i \quad at \quad r \le d/2$$

$$V_c = 0 \quad at \quad r = r_{ti} \tag{(YY)}$$

با درنظر 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:

$$V_{ci} = \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} V_i$$
 (11)

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

$$dm = h(2\pi r)\rho dr \tag{(14)}$$

$$E_{Ci} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi d^2}{4} \rho h \right) V_i^2 + \int_{d/2}^{r_{ti}} \frac{1}{2} (2\pi h \rho r) \left( \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} \right)^2 dr \qquad (\Upsilon\Delta)$$

$$E_{Ci} = \frac{\pi \rho h d^2 V_i^2}{8} + \frac{\pi \rho h V_i^2}{(2r_{ti} - d)^2} \\ \left(\frac{1}{3}r_{ti}^4 - \frac{1}{2}r_{ti}^2 d^2 + \frac{1}{3}r_{ti} d^3 - \frac{1}{16}d^4\right) \quad (79)$$

### 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

جرم	قطر	ضخامت	حد بالستيک	حد بالستيک	م حع
پرتابه	پرتابه	هدف	تئورى	تجربى	<i>C</i> . <i>J</i> .
(gr)	(mm)	(mm)	(m/s)	(m/s)	
۲/۸	۵	۲	107/0	10.	[۶]
٣/٣٣	۴/۷۶	۴/۵	171	140	[1+]
۳/۸۴	۶/۳۵	۴/۵	۲ • ۲/۵	۲۱۰	[1.]

۱۶ www.SID.ir

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 معمولا بیشترین خطا را خواهد داشت، صورت می گیرد.

جهت تحلیل بیشتر فرایند نفوذ، نتایج بهدست آمده از تئوری ارائهشده در این مقاله با نتایج تجربی ارائهشده در مرجع [8] مورد ارزیابی قرار می گیرد. هدف از جنس ماده مرکب شیشه/پوکسی با بافت دوبعدی با مشخصات دادهشده در جدول تیشه/پوکسی با بافت دوبعدی با مشخصات دادهشده در جدول ۲ بوده و حد بالستیک اندازه گیریشده آن  $V_b$ =۱۵۰m/s است. با استفاده از مدل تحلیلی ارائهشده در این تحقیق، حد بالستیک  $V_b$ =۱۵۲/۵m/s بهدست می آید.

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

	مشخصات پرتابه
Flat ended	شکل
$M_p = \Upsilon / \Lambda \mathrm{gr}$	جرم
<i>d</i> =∆mm	قطر
	مشخصات هدف
2D Woen Glass/ Epoxy	جنس
<i>V1</i> =%۵·	درصد حجمي الياف
<i>h=</i> ĭmm	ضخامت
N1=9	تعداد لايه ها
<i>Nf=</i> ٣	تعداد الياف اوليه در يک لايه
$\rho = 1 \forall \Delta \cdot kg/m^3$	جرم حجمی
$u=\Upsilon \Lambda MJ/m^3$	انرژی شکست کامپوزیت
$E_m = \cdot / $ MJ/m <sup>3</sup>	انرژی ترک خوردگی رزین
$G_{II}=$ \···MJ/m <sup>2</sup>	نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی
$b=\cdot / A \Delta$	ضريب انتقال موج تنش
$\mathcal{E}_d = \cdot / \mathcal{E}_R$	كرنش استانه خرابي
<i>C1=</i> •/9	ضريب كاهش سطح

انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای مختلف در سرعت  $V_b$ انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای مختلف در این حالت  $V_b$ انرژی جنبشی اولیه پرتابه برابر با ۳۲/۷۷ است. در انتهای فرایند برخورد، ۱۸/۹۷ درصد از انرژی اولیه پرتابه باقی می ماند.

و سرعت باقیمانده پرتابه برابر *V*<sub>r</sub>=۶۶/۶۴m/s است. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، بیشترین انرژی جذب شده مربوط به مکانیزم تغییر شکل الیاف ثانویه است. مکانیزمهای مهم دیگر جذب انرژی شکست کششی الیاف اولیه و انرژی جنبشی مخروط ایجاد شده در پشت صفحه هدف هستند.



شکل ۵ انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای مختلف (V<sub>i</sub>=۱۵۳m/s)

سرعت مخروط ایجادشده در پشت هدف در ابتدا صفر بوده و با افزایش زمان افزایش مییابد. از طرفی دیگر شعاع قاعده مخروط ایجادشده و به تبع آن جرم، آن با افزایش زمان و مقدار نفوذ، افزایش مییابد. انرژی جذب شده توسط لایه لایه ای شدن صفحات هدف و به ویژه ترکخوردگی ماتریس، همان طور که انتظار می رفت، بسیار کم بوده و قابل صرف نظر کردن می باشند.

در انتهای فرایند نفوذ، انرژی جذب شده از پرتابه توسط مکانیزمهای انرژی جنبشی مخروط، تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، شکست کششی الیاف اولیه، لایه لایه ای شدن صفحات هدف و ترک خوردگی ماتریس به ترتیب ۱۱/۳۶، ۵۲/۶۳، ۲۷/۴۹ کا/۵۲ و ۰/۰۰۱ درصد از گل انرژی جذب شده می با شد.

زمانی که کرنش الیاف اولیه از کرنش مجاز نهایی تجاوز کند، این الیاف شکسته می شوند. شکست یک لایه زمانی اتفاق می افتد که تمامی الیاف اولیه آن لایه شکسته شوند و زمانی که تمامی لایه های کامپوزیت شکسته شود، نفوذ کامل اتفاق خواهد افتاد. فرایند نفوذ زمانی به پایان می رسد 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.



شکل ۶ تغییرات سرعت پرتابه، حداکثر کرنش در وسط تار در لایه بالایی و حداکثر کرنش در تار کناری در لایه پایینی (V<sub>i</sub>=۱۵۳m/s)

شکلهای ۷ و ۸ حالتی را نشان میدهد که سرعت برخورد مقدار خیلی کمی از حد بالستیک پایین تر است (Vi= ۱۵۲m/s). 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 (Vi=۱۵۲m/s)

همانند حالت قبل، بیشترین انرژی جذبشده مربوط به مکانیزم تغییر شکل الیاف ثانویه است، ولیکن در انتهای فرایند برخورد، انرژی جنبشی مخروط ایجادشده، بر خلاف حالت قبل، به دلیل اینکه سرعت نهایی پرتابه صفر میشود، کسر کوچکی از کل انرژی جذبشده میباشد (شکل ۲). همچنین، مشاهده میشود مکانیزم شکست کششی الیاف اولیه درصد بالاتری از

کل انرژی جذب شده را به خود اختصاص داده است. در انتهای فرایند نفوذ، انرژی جذب شده از پرتابه توسط مکانیز مهای انرژی جنبشی مخروط، تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، شکست کششی الیاف اولیه، لایه لایه ای شدن صفحات هدف ساخته شده از مواد مرکب چند لایه ای و ترک خوردگی ماتریس به ترتیب ۸/۳۷، ۶۹/۶۸، ۲۲/۰۰ و ۲۰۰۱۰ درصد از کل انرژی جذب شده می باشد. مشاهده می شود، همانند حالت قبل، انرژی جذب شده توسط مکانیز مهای لایه لایه ای شدن هدف و به ویژه ترک خوردگی ماتریس بسیار کم و قابل صرف نظر کردن هستند. شکل ۸ نشان می دهد، به دلیل کاهش زیاد سرعت پرتابه پس از افزایش اولیه کرنش در لایه پایینی، کرنش کاهش می یابد.



شکل ۸ تغییرات سرعت پرتابه، حداکثر کرنش در وسط تار در لایه بالایی و حداکثر کرنش در تار کناری در لایه پایینی (V<sub>i</sub>=۱۵۲m/s)

۶- نتیجهگیری

یک مدل تحلیلی بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به فواصل زمانی نفوذ کوچک و محاسبه انرژی جذبشده توسط مکانیزمهای مختلف جذب انرژی در هر یک از این فواصل زمانی برای نفوذ پرتابههای سرتخت در اهداف ساختهشده از مواد مرکب شیشه/پوکسی با بافت دوبعدی ارائه گردید.

نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی محققان دیگر مقایسه و همخوانی نسبتا خوبی مشاهده گردید.

۷- فهرست علايم

- a عرض تار A سطح مقطع تار
- i شتاب پرتابه در فاصله زمانی  $ac_i$

۶٫۷۶ کرنش در تار اولیه ۶٫۷ کرنش در تار ثانویه σ تنش پلاستیک ρ چگالی هدف

- 1. Laible R. C., Editor, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Amsterdam, Elsevier, 1980, p. 9.
- 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.
- 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.
- Naik N. K., Shrirao 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.
- Wu E., Chang L., "Woven Glass/Epoxy Laminates Subject to Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, 1995, pp. 607-619.
- 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.
- 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.
- 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., Shrirao P., Reddy B. C. K., "Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Parametric Studies", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 412, 2005, pp. 104-116.

تحلیل تئوری فرایند نفوذ پرتابههای سر تخت در مواد ...

- b ضريب انتقال موج تنش
  - ضریب کاهش سطح  $c_1$
  - سرعت موج االاستیک  $C_e$
  - سرعت موج پلاستيک  $c_p$ 
    - سرعت موج عرضی  $^{C_t}$ 
      - d قطر پرتابه
- i انرژی منتقل شده به مخروط در فاصله زمانی  $E_{Ci}$
- i انرژی جذبشده بهدلیل لایهای شدن در فاصله زمانی  $E_{Di}$ 
  - مدول کششی کامیوزیت  $E_i$ 
    - *E*<sub>L</sub> انرژی ازدست رفته پرتابه
- i انرژی ازدست رفته پرتابه در انتهای فاصله زمانی  $E_{Li}$
- $E_m$  انرژی جذبشده بهدلیل ترکخوردگی رزین بر واحد حجم
- i انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین در انتهای فاصله زمانی  $E_{Mi}$ 
  - i انرژی جذبشده توسط تارهای اولیه در انتهای فاصله زمانی  $E_{Pi}$
  - i انرژی جذبشده توسط تارهای ثانویه در انتهای فاصله زمانی  $E_{Si}$ 
    - i نیروی مقاوم در برابر حرکت پرتابه در فاصله زمانی  $F_i$ 
      - $G_{II}$  نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی
        - ضخامت كامپوزيت h
          - ضخامت یک لایه  $h_1$
        - KE انرژی جنبشی پرتابه
          - m جرم پرتابه
      - iشعاع جدایش یک لایه در فاصله زمانی  $r_{di}$
    - i فاصله پیموده شده توسط موج پلاستیک تا فاصله زمانی  $r_{pi}$
    - i فاصله پیموده شده توسط موج عرضی تا فاصله زمانی  $r_{ti}$ 
      - سرعت اوليه پرتابه  $V_0$ 
        - حد بالستيک  $V_b$
      - i سرعت مخروط ایجادشده در فاصله زمانی  $V_{ci}$ 
        - i سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی  $V_{i+1}$ 
          - درصد حجمی رزین  $V_m$
          - سرعت باقىماندە پرتابە  $V_r$
      - i فاصله پیمودهشده توسط پرتابه تا فاصله زمانی  $Z_i$ 
        - ۶ کرنش
        - <sup>2</sup> کرنش حداکثر در یک تار
        - i کرنش حداکثر در یک لایه در فاصله زمانی  ${}^{\mathcal{E}_{0i}}$
  - i کرنش حداکثر یک لایه بهدلیل ایجاد مخروط در فاصله زمانی  $arepsilon_{0i}$
  - کرنش حداکثر در یک لایه بهدلیل فشار مستقیم در لایه بالایی در  $\mathcal{E}_{0i}^{\prime\prime\prime}$  فاصله زمانی i
    - کرنش پلاستیک  $arepsilon_p$