

# بررسی تحلیلی جذب انرژی و آسیب لایه‌لایه‌شدگی در صفحات کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوذرات تحت برخورد سرعت بالا

رضا محمدی پور<sup>۱</sup>، احسان زمانی<sup>۲</sup>، محمدحسین پل<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، zamani.ehsan@eng.sku.ac.ir

۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

## چکیده

در این مقاله به بررسی تحلیلی جذب انرژی و آسیب لایه‌لایه‌شدگی در صفحات نازک کامپوزیتی تقویت‌شده با نانوذرات تحت برخورد با سرعت بالا پرداخته شده است. مناطق مختلفی طی فرایند برخورد در صفحات نانوکامپوزیت در نظر گرفته شده که عبارت‌اند از ناحیه شکست، ناحیه تغییر شکل غیرخطی، ناحیه بدون تغییر شکل و ناحیه لایه‌لایه‌شدن. خواص مکانیکی مانند مدول کششی، کرنش شکست، مدول برشی، چقرمگی شکست و نیز مشخصات هندسی پرتابه و هدف به‌عنوان ورودی به مدل تحلیلی داده شده است. در ادامه، به کمک روابط تحلیلی و داده‌های ورودی خیز، کرنش‌ها و تنش‌های اطراف محل برخورد در هدف به‌دست آمده است. همچنین میزان انرژی‌های جذب‌شده در حالت‌های مختلف شکست و تغییرات انرژی جنبشی پرتابه و هدف در بازه‌های زمانی کوچک، شعاع ناحیه آسیب و انرژی لایه‌لایه‌شدگی و سرعت خروجی پرتابه تخمین زده شده است. در نهایت نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی برخورد با سرعت بالا روی صفحات نانوکامپوزیت مقایسه و تطابق خوبی مشاهده شده است. در انتها با توجه به نتایج به‌دست آمده اثر نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی مواد کامپوزیت و بررسی مودهای مختلف شکست مورد بحث قرار گرفته است.

## واژگان کلیدی

برخورد با سرعت بالا، نانوکامپوزیت، جذب انرژی، آسیب لایه‌لایه‌شدگی

## ۱. مقدمه

هوایی و نظامی مورد توجه قرار گرفته است. این بهبود در عملکرد عموماً به دلیل تقویت‌شدن فاز ماتریس و اصلاح خواص بین سطحی مانند پیوندهای شیمیایی مستحکم‌تر به‌واسطه حضور

در سال‌های اخیر استفاده از نانومواد مرکب به‌منظور افزایش خواص مکانیکی چون استحکام و سختی ویژه، چقرمگی شکست، بهبود خواص حرارتی و نفوذپذیری در علوم فضایی، فناوری‌های

ذرات نانو در فاز ماتریس رخ می‌دهد. از جمله نانوموادى که به‌طور گسترده در مواد مرکب پایه پلیمرى مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به نانوذرات سیلیکا، نانورس، نانوذرات آهن، نانو الیاف پلیمرى الکتروریسی<sup>۱</sup> و نانو لوله‌ها اشاره کرد [۱]. افزودن مقداری نانوذره می‌تواند خواص مکانیکی همچون سختی، چقرمگی شکست، مقدار جذب انرژی برخورد و میرایی ارتعاشات مواد مرکب را بهبود دهد. از طرفی جذب انرژی برخورد یک نانومادهٔ مرکب هیبریدی به نوع مؤلفه‌های آن؛ یعنی الیاف، رزین و نانوذرات و خواص بین آنها، نسبت وزنی ذرات، درصد حجمی الیاف و کیفیت و روش پخش نانوذرات بستگی دارد [۲].

از جمله بارگذاری‌های مهم در تحلیل دینامیکی مواد مرکب و نانومواد مرکب، بارگذاری ضربه است. به‌دلیل مقاومت و سختی ویژه (خواص نسبت به وزن) بالا آنها نسبت به فلزات، در دو دهه اخیر تحقیقات فراوانی جهت بررسی خواص بالستیک این مواد به‌صورت تجربی، تئوری و عددی انجام شده است. بیدی و همکاران [۳] رفتار ورق دولایه فولاد - پلی‌اوریا در مقابل بار ضربه‌ای و همچنین اثر افزودن نانورس به پلی‌اوریا را به‌صورت تجربی و مدلسازی عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که افزودن نانورس به مادهٔ پلیمری مقدار جذب انرژی را حدود ۳ درصد افزایش و حداکثر تغییر شکل ماندگار را حدود ۷ درصد کاهش می‌دهد. محققان و همکاران [۴] رفتار نانومواد کامپوزیت پلی‌اتیلن با نانورس تحت آزمون نفوذ شبه‌استاتیک و آزمون ضربهٔ دینامیکی را مورد مطالعه قرار دادند و متذکر شدند که قابلیت انرژی جذب‌شدهٔ پلی‌اتیلن تحت آزمون نفوذ شبه‌استاتیک کاهش می‌یابد.

اویلا و همکاران [۵] اثر نانورس و نانوگرافیت را در مواد مرکب شیشه‌ای / اپوکسی با استفاده از آزمون ضربهٔ بالستیک مطالعه کردند. به گفتهٔ آنها، افزودن ورقه‌های نانورس و نانوگرافن به مواد مرکب شیشه / اپوکسی چندلایه نه تنها مقاومت به ضربه را افزایش می‌دهد، که تأثیر عمده‌ای بر مکانیزم‌های شکست دارد. رحیمی و همکاران [۶] رفتار شکست لوله‌های کامپوزیتی ساخته‌شده به‌روش رشته‌پیچی با الیاف شیشه، لاینر داخلی و نانوذرات سیلیکا تحت بار ضربه را به‌صورت تجربی بررسی کردند. مدول الاستیک و تنش نهایی رزین تقویت‌شده با ۳ درصد سیلیکا، به‌ترتیب به‌میزان ۳۶ درصد و ۱۷ درصد بهبود یافته است. از طرفی برای مدلسازی فرایند نفوذ پرتابه‌ها در اهداف ساخته‌شده از

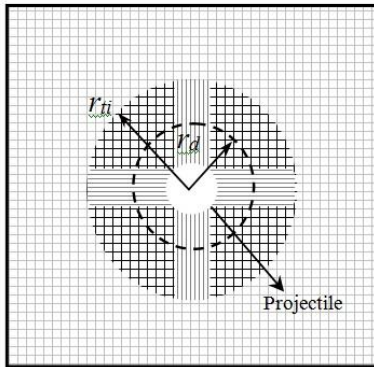
ورق‌های نازک مواد مرکب و نانومواد مرکب، مدل‌های تحلیلی مختلفی ارائه شده است. در این تحقیقات مکانیزم‌های جذب انرژی مختلفی مانند شکست کششی الیاف، تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، انرژی جنبشی مخروط تشکیل شده در پشت صفحهٔ هدف، لایه‌لایه‌شدن، ترک خوردن ماتریس، برش پلاگ و اصطکاک بین پرتابه و هدف در طی فرایند نفوذ معرفی شده‌اند [۷-۱۲]. در ابتدا مینس و موریه [۷-۸] مدل‌های ساده و مبتنی بر نتایج تجربی را ارائه کردند. این مدل‌ها برای تخمین رفتار بالستیک، به انجام آزمایشات بالستیک نیاز مبرم داشتند که یک نقص برای پیش‌بینی رفتار بالستیک و طراحی سازه‌های کامپوزیتی تحت ضربهٔ بالستیک بود. لذا نیک و همکاران [۹] با در نظر گرفتن مؤلفه‌های جذب انرژی ارائه‌شده توسط موریه، بر پایهٔ تقسیم مدت زمان نفوذ به مؤلفه‌های کوچک و محاسبهٔ انرژی جذب‌شده توسط هر یک از این مکانیزم‌ها طی هر بازهٔ زمانی، مدل تئوری خود را معرفی کردند. پل و لیاقت [۱۰-۱۱] بر پایهٔ تئوری نیک و همکاران و اصلاح روابط این تئوری، فرایند نفوذ پرتابه‌های سرتخت در اهداف نانوکامپوزیت رسی را با دقت بالاتری تخمین زدند. آنها امکان شکسته‌شدن لایه‌به‌لایه در اهداف نانوکامپوزیت چندلایه در حین فرایند نفوذ را بررسی کردند. بالانگسن و همکاران [۱۳] با جایگزین کردن عرض الیاف با قطر پرتابه در روابط مدل تحلیلی نایک، سرعت حد بالستیک در نانو مواد مرکب تقویت‌شده با نانوذرات رسی را محاسبه کردند.

همان‌طور که مرور ادبیات پژوهشگران نشان می‌دهد اکثر مدل‌های تحلیلی بررسی رفتار بالستیک نانوکامپوزیت‌ها به‌صورت یک‌بعدی هستند و به‌دلیل محدودیت اندازه‌گیری و نبودن اطلاعات کافی از نحو تغییر شکل، تغییرات کرنش و تنش ورق تحت ضربه بالستیک در نواحی مختلف، از فرضیات ساده‌کننده و توابع خطی بین این ناحیه‌ها و لایه‌های مختلف استفاده کردند.

در این پژوهش تغییر شکل ورق نانوکامپوزیت چندلایه تحت برخورد بالستیک به‌کمک یک تابع چندمتغیره مناسب در نظر گرفته می‌شود. سپس به‌کمک روابط فن کارمن در جهات مختلف، امکان بررسی تغییرات کرنش‌های غیرخطی در ناحیه‌های مختلف و در تمامی لایه‌ها حاصل می‌شود. با توجه به کرنش‌های غیرخطی به‌دست آمده در هر لایهٔ انرژی کرنشی ذخیره‌شده در هر لایه نیز قابل محاسبه است. لذا به‌طور کلی سعی شده است که تغییر شکل، کرنش، سرعت، انرژی‌های جذب‌شده و تعیین

جنبشی و جذب شده در هر یک از این بازه‌های زمانی به دست می‌آید. با نوشتن رابطه تعادل انرژی پرتابه، سرعت خروجی آن در انتهای هر یک از بازه‌های زمانی محاسبه می‌شود.

Nonlinear deformed region      Undeformed region  
 Fracture region      Delamination region



شکل ۱. قسمت‌های مختلف ورق در حین فرایند برخورد با سرعت بالا

در آغاز و در اولین فاصله زمانی ضربه، کل انرژی به شکل انرژی جنبشی پرتابه است:

$$E_{KE} = \frac{1}{2} m_p V_s^2 \quad (1)$$

که در آن  $m_p$  و  $V_s$  به ترتیب جرم پرتابه و سرعت اولیه هستند. برای تجزیه و تحلیل رویداد ضربه سرعت بالا، مدت زمان تماس را می‌توان به تعداد مساوی از فواصل زمانی از طول مدت  $\delta t_i$  تقسیم کرد. کل انرژی جذب شده توسط هدف یا انرژی از دست داده شده توسط پرتابه در پایان بازه زمانی  $i$  ام عبارت‌اند از:

$$E_{Li} = E_{fi} + E_{eli} + E_{di} \quad (2)$$

$$C_l = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)} \quad (3)$$

$$C_t = C_l \left( \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon \right) \quad (4)$$

که  $\varepsilon$  کرنش به وجود آمده در ورق کامپوزیتی چندلایه است. کرنش اولیه به وجود آمده در ورق  $\varepsilon_0$  در لحظه تماس پرتابه با ورق از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$3\varepsilon_0^4 + 4\varepsilon_0^3 - 2\frac{V_s^2}{C_l^2} \varepsilon_0^2 - \frac{V_s^4}{C_l^4} = 0 \quad (5)$$

لذا در فاصله زمانی  $i$  ام، فاصله طی شده توسط موج عرضی و موج طولی به ترتیب برابر است با [۱۱]:

$$rt_i = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{tn} \Delta t \quad (6)$$

$$rl_i = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{ln} \Delta t \quad (7)$$

محدوده لایه‌لایه شده با کمترین فرضیات ممکن و محدودیت تخمین زده شود.

## ۲. مدل ریاضی

### ۲-۱. مقدمه

نظریه‌های مختلفی برای توضیح مقاومت اهداف نانوکامپوزیت در برابر نفوذ پرتابه ارائه شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله، به طور کلی مدل‌های تحلیلی پیشنهاد شده به کمک برخی از مفروضات و تعاریف اساسی و تقریب‌ها ساده‌سازی شده‌اند. در تحقیق حاضر، نخست کل مدت زمان برخورد به جزیهای زمانی کوچکتر تقسیم شده، سپس برای استخراج روابط مدل ریاضی، پیش‌فرض‌های اساسی و ساده‌کننده‌ای جهت بررسی تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ از آن جمله اینکه پرتابه صلب است و در طول نفوذ بدون تغییر باقی می‌ماند، سرعت پرتابه در هر فاصله زمانی ثابت است، سرعت پرتابه در فاصله زمانی اول با سرعت اولیه پرتابه برابر است، انرژی جذب شده توسط محدوده شکست پس از شکست ثابت باقی می‌ماند، از انرژی ترک خوردگی ماتریس صرف‌نظر می‌شود، تغییر شکل‌های درون‌صفحه‌ای در مقایسه با تغییر شکل‌های عرضی یا خیز ورق کامپوزیتی قابل صرف‌نظر است، پرتابه و ناحیه متحرک محلی در پشت هدف با سرعت یکسان و برابر سرعت انتهای بازه  $i$  ام در حال حرکت هستند و در پایان هر بازه زمانی سرعت مرحله بعد دست می‌آید. در این پژوهش در طی فرایند نفوذ چهار ناحیه برای ورق در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱):

۱. محدوده شکست که دقیقاً در زیر پرتابه و به اندازه قطر

پرتابه است و نیروی مقاوم در برابر نفوذ پرتابه را ایجاد می‌کند

۲. ناحیه لایه‌لایه شدن ورق نانوکامپوزیت که در آن آسیب لایه‌لایه‌شدگی رخ داده است

۳. فاصله بین محدوده شکست تا شعاع گسترش موج عرضی، که محدوده تغییر شکل غیرخطی نامگذاری می‌شود

۴. از شعاع گسترش موج عرضی تا انتهای ورق محدوده بدون تغییر شکل نامگذاری می‌شود

کل مدت زمان برخورد به جزیهای زمانی کوچکتر تقسیم شده و با در نظر گرفتن فرایند نفوذ چندمرحله‌ای، سهم انرژی‌های

که  $d$  قطر پرتابه و  $\Delta t$  بازه زمانی هستند.

ضربه به دست می‌آیند. ارتباط تنش و کرنش برای مواد نانوکامپوزیت ارتوتروپیک به صورت زیر بیان می‌شود [۱۵].

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xi} &= \frac{8\Delta Z_i(\Delta Z_i - z)}{(2r_{ti} - d)^2}, \\ \varepsilon_{yi} &= \frac{2\Delta Z_i(\Delta Z_i - z)}{r_{ti}^2}, \\ \varepsilon_{xyi} &= -\frac{4\Delta Z_i(\Delta Z_i - 2z)}{r_{ti}(2r_{ti} - d)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

که  $\overline{Q}_{ij}$  ماتریس سختی نام دارد و درایه‌های

آن به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\overline{Q}_{ij} = [T^{-1}][Q][T] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{22} \\ &= \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{33} = G_{12} \end{aligned} \quad (13)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin^2\alpha & 2\sin\alpha\cos\alpha \\ \sin^2\alpha & \cos^2\alpha & -2\sin\alpha\cos\alpha \\ -\sin\alpha\cos\alpha & \sin\alpha\cos\alpha & \cos^2\alpha - \sin^2\alpha \end{bmatrix} \quad (14)$$

که  $T$  ماتریس دوران،  $\alpha$  زاویه لایه‌چینی هستند. بنابراین در

نهایت تنش‌های غیرخطی در نقطه برخورد به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned} \sigma_{xi} &= \frac{8E_{11}\Delta Z_i(\Delta Z_i - z)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})(2r_{ti} - d)^2} \\ &\quad + \frac{2\nu_{12}E_{22}\Delta Z_i(\Delta Z_i - z)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})r_{ti}^2} \\ \sigma_{yi} &= \frac{8\nu_{12}E_{22}\Delta Z_i(\Delta Z_i - z)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})(2r_{ti} - d)^2} \\ &\quad + \frac{2E_{22}\Delta Z_i(\Delta Z_i - z)}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})r_{ti}^2} \\ \sigma_{xyi} &= -\frac{4G_{12}\Delta Z_i(\Delta Z_i - 2z)}{r_{ti}(2r_{ti} - d)} \end{aligned} \quad (15)$$

### ۲-۳. انرژی جذب شده توسط محدوده تغییر شکل غیر خطی

انرژی جذب شده در محدوده تغییر شکل غیرخطی با کل انرژی کرنشی خمشی و غشایی ذخیره شده ورق نازک در این محدوده برابر و تابعی از تغییر شکل‌های عرضی و کرنش‌های غیرخطی فن کارمن است. انرژی کرنش کل ورق مستطیل شکل را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۵]:

$$E_T = \frac{1}{2} \int_{\Omega_0} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\varepsilon_{yy} + \sigma_{xy}\varepsilon_{xy}) dV \quad (16)$$

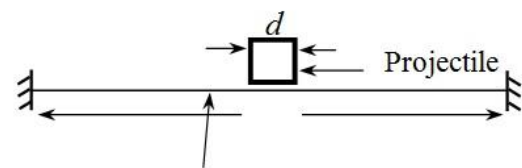
### ۲-۲. تعیین خیز، کرنش‌ها و تنش‌های غیرخطی

در این مقاله چون چرخش در نظریه تغییر فرم‌های بزرگ زیاد است از تغییر شکل‌های درون صفحه‌ای در مقایسه با تغییر شکل‌های عرضی صرف نظر می‌شود؛ اما امکان صرف نظر کردن از چرخش وجود ندارد [۱۴]. لذا برای محاسبه خیز، کرنش‌ها و تنش‌های غیرخطی در ورق‌های نانوکامپوزیتی، با توجه به تغییر شکل‌های بزرگی تحت برخورد بالستیک از تابع تغییر شکل زیر استفاده می‌شود (شکل ۲).

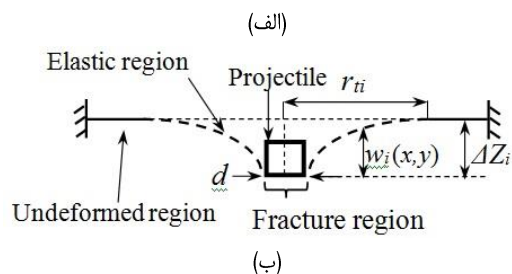
$$w_i(x, y) = \begin{cases} \Delta Z_i & x, y \leq \frac{d}{2} \\ \frac{4\Delta Z_i(x - r_{ti})^2(y - r_{ti})^2}{r_{ti}^2(2r_{ti} - d)^2} & \frac{d}{2} \leq x, y \leq r_{ti} \end{cases} \quad (8)$$

که  $\Delta Z_i$  تغییر مکان مرکز ورق در پایان بازه زمانی  $i$  ام و  $x, y$  دستگاه مختصات هستند. به کمک مفروضات اساسی تئوری کلاسیک ورق، کرنش‌های غیرخطی فن کارمن متناظر با نظریه تغییر شکل‌های بزرگ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۵].

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (9)$$



شکل ۲. شماتیک ورق؛ الف) قبل از برخورد، ب) بعد از برخورد



شکل ۲. شماتیک ورق؛ الف) قبل از برخورد، ب) بعد از برخورد

با جایگزینی معادله ۸ در معادلات ۹ و قرار دادن  $x=0$  و  $y=d/2$  پس از ساده کردن روابط زیر برای تغییرات کرنش در نقطه

## ۲-۵. انرژی جذب‌شده ناشی از حرکت موضعی ورق

در طول رویداد ضربه سرعت بالا، تغییر شکل‌های محلی در سطح پشت هدف بخشی از انرژی جنبشی پرتابه را جذب می‌کند. همه نقاط ناحیه محلی در حال حرکت ورق، سرعت‌های مختلفی بر اساس فاصله آنها از نقطه ضربه دارند. بنابراین تغییرات سرعت با توجه به تابع درجه دوم زیر از نقطه ضربه تا مرز موج عرضی الاستیک محاسبه می‌شود:

$$V_i(r) = 4V_i \frac{(rt_i^2 - r^2)}{(4rt_i^2 - d^2)} \quad (22)$$

که در آن  $V_i$  سرعت در پایان بازه زمانی  $i$  ام است. انرژی جنبشی ناحیه محلی در حال حرکت صفحه را می‌توان با استفاده از معادله زیر در فاصله زمانی  $i$  ام بیان کرد:

$$KE_{Lmi} = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{ti}} \rho h V_i^2(r) r dr d\theta = M_{Ci} V_i^2 \quad (23)$$

که در آن  $M_{Ci}$  جرم لحظه‌ای ناحیه محلی در حال حرکت از ورق است. در این اینجا فرض شده است که پرتابه و ناحیه محلی متحرک با سرعت یکسان و برابر سرعت انتهای بازه  $i$  ام در حال حرکت هستند.

## ۲-۶. انرژی جذب‌شده به علت ورقه‌ورقه شدن لایه‌ها

در طول رویداد ضربه، قبل از شکستن لایه‌ها، آسیب ورقه‌ورقه شدن و ترک‌خوردگی ماتریس در اطراف نقطه ضربه مد نظر قرار می‌گیرد که مقداری از انرژی اولیه پرتابه را جذب می‌کند. آسیب لایه‌لایه شدن بادام‌زمینی شکل (شکل الف-۳) ناشی از ضربه بسیار پیچیده است و با ترک‌های ماتریسی و تعدادی از لایه‌های مجزاشده از هم به شکل نامنظم و در طول ضخامت ترکیب شده است [۱۶]. جداشدن لایه‌های مجاور بستگی به تنش‌های وارد بر سطح اتصال،  $\sigma_z$  تنش نرمال و تنش‌های برشی بین‌لایه‌ای  $\tau_{xz}$  و  $\tau_{yz}$  دارد [۱۷]. اما با توجه به فرض  $\sigma_z = 0$  در تئوری کلاسیک ورق‌های نازک، نمی‌توان از معیارهای لایه‌لایه شدن استفاده کرد. برای ساده‌سازی، آسیب لایه‌لایه شدن‌های واقعی با چند دایره در لایه‌های مختلف که دارای سطح و مرز بیرونی یکسان هستند (شکل ب-۳)، معادل‌سازی می‌شود [۱۶] و شروع لایه‌لایه شدن با استفاده از مقایسه نیروی تماس و بحرانی تخمین زده می‌شود. بنابراین در ابتدا بار بحرانی لایه‌لایه شدن محاسبه

با قرار دادن روابط ۱۰ تا ۱۵ در معادله ۱۶، انرژی کرنشی ذخیره‌شده در یک ورق نانوکامپوزیت چندلایه متقارن در ناحیه تغییر شکل غیرخطی به دست می‌آید. مقادیر  $E_{bi}$  و  $E_{mi}$  به ترتیب انرژی خمشی و غشائی هستند. همچنین  $D_{ij}$  و  $A_{ij}$  به ترتیب سختی کششی و خمشی هستند که توسط روابط زیر به دست می‌آیند:

$$E_T = E_{eli} = E_{bi} + E_{mi} \\ E_{bi} = \frac{2}{45} \frac{(2r_{ti} - d)^2 \Delta Z_i^2}{r_{ti}^4} \times \{9(D_{11} + D_{22}) + 10(D_{12} + 8D_{66})\} \quad (17)$$

$$E_{mi} = \frac{1}{17640} \frac{(2r_{ti} - d)^6 \Delta Z_i^4}{r_{ti}^8} \times \{49(A_{11} + A_{22}) + 90(A_{12} + 2A_{66})\}$$

$$A_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij} dz \quad (18)$$

$$D_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij} z dz$$

## ۲-۴. انرژی جذب‌شده در محدوده شکست

در هر لایه، حداکثر کرنش در نقطه ضربه رخ داده و با فاصله از نقطه ضربه در ناحیه شکست به دلیل میرایی تنش کاهش می‌یابد. لذا می‌توان آن را با رابط نمایشی به صورت زیر در نظر گرفت [۹].

$$\varepsilon_{x,y} = \varepsilon_{mx_i,my_i} b^{x,y/d} \quad (19)$$

که در آن  $\varepsilon_{x,y}$  کرنش در هدف در جهت  $x,y$   $\varepsilon_{mx_i,my_i}$  حداکثر کرنش؛ یعنی کرنش در نقطه ضربه در جهت  $x,y$  فاصله از نقطه ضربه،  $b$  عامل انتقال موج تنش و  $d$  قطر پرتابه هستند. با استفاده از معیار کرنش ماکزیمم، انرژی شکست هر یک از لایه‌ها با ضرب حجم منطقه شکست در ناحیه زیر منحنی تنش - کرنش تا کرنش شکست به دست می‌آید:

$$E_{fi} = A \int_0^{r_{ti}} \left( \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \quad (20)$$

$$A = \frac{h}{N_l} d$$

که در آن  $h$  ضخامت کل صفحه  $N_l$  تعداد لایه‌ها هستند. چون منطقه شکست در نظر گرفته شده یک‌چهارم ورق است، برای محاسبه کل انرژی شکست رابطه فوق در ضرایب ۴ و  $N_f$  (تعداد لایه شکست‌خورده در هر فاصله زمانی) ضرب می‌شود:

$$E_{fi} = 4 \times N_{fi} \times A \int_0^{r_{ti}} \left( \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx \quad (21)$$

انرژی لایه‌لایه شدن محاسبه شده و در رابطه زیر قرار داده می‌شود:

$$\delta W = \delta E_T + \delta E_d \quad (28)$$

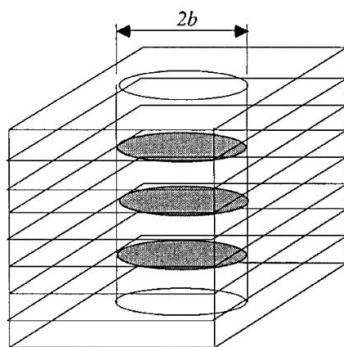
با استفاده از قرار دادن روابط ۲۷-۲۸ در رابطه ۲۸ و حذف  $\delta r_d$ ، بار بحرانی لایه‌لایه شدن به دست می‌آید:

$$F_d = 3\pi \left( \frac{2\pi G_{II} D}{1 - \frac{D'}{5D}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

در ادامه شعاع لایه‌لایه شدن با ارزیابی تنش برشی عرضی در میان لایه مناسب و برابر قرار دادن آن با استحکام برشی بین لایه‌های ILSSG/E، به دست می‌آید:

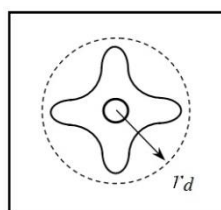
$$r_d = \frac{F_d}{2\pi h(ILSSG/E)} \quad (30)$$

گفتنی است  $h$  با توجه به حرکت پرتابه و افزایش عمق نفوذ و همچنین کاهش تعداد لایه‌های باقیمانده ورق نانوکامپوزیت، به صورت  $h' = (h - (Nf * h/Nl))$  در نظر گرفته شد.  $h/Nl$  بیانگر ضخامت هر لایه و  $Nf$  نشان‌دهنده تعداد لایه‌های شکسته شده می‌باشد. در وجه جلوی ورق، یک منطقه کوچک از لایه‌لایه شدن تقریباً دایره‌ای در نواحی اطراف منطقه شکست دیده می‌شود. در شکل ۵ به‌طور شماتیک نشان داده شده است که شکل منطقه لایه‌لایه شدن در وجه عقب هدف مانند پروانه است.



(ب)

شکل ۳. معادل‌سازی لایه‌لایه شدن واقعی با لایه‌لایه شدن دایره‌ای شکل در لایه‌های مختلف [۱۶]



شکل ۵. شماتیک ناحیه لایه‌لایه شدن

می‌شود. بدین‌منظور یک ورق دایره‌ای کامپوزیتی به شعاع  $r_d$  تحت نیروی متمرکز  $F_d$  همانند شکل ۴ در نظر بگیرید که تغییر شکل استاتیکی عرضی زیر در آن رخ می‌دهد:

$$w(x, y) = \frac{F_d}{2\pi D r_d^2} [(x - r_d)^2 (y - r_d)^2] \quad (34)$$

$$D = \frac{1}{8} (3D_{11} + 2D_{12} + 4D_{33} + 3D_{22})$$

که در آن  $D$  سختی خمشی متوسط نامیده می‌شود. با استفاده از رابطه ۲۴ و روابط ۱۰ تا ۱۶ و انتگرالگیری در مختصات قطبی انرژی کرنشی ذخیره‌شده را به‌صورت زیر دست می‌دهد:

$$E_T = \frac{r_d^2 F_d^2 D'}{(8\pi D)^2} \quad (35)$$

$$D' = \left( \frac{D_{11} + D_{22}}{10} + \frac{D_{12} + 8D_{33}}{9} \right)$$

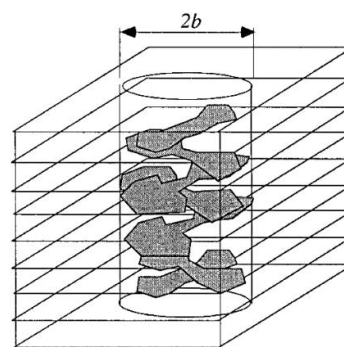
که در آن  $D'$  سختی خمشی معادل نامیده می‌شود. کار نیروی خارجی که در مرکز صفحه متمرکز شده، برابر است با:

$$W = \int_0^{r_d} \int_0^{r_d} \frac{F_d}{\pi r_d^2} w(x, y) dx dy = \frac{F_d^2 r_d^2}{18\pi^2 D} \quad (36)$$

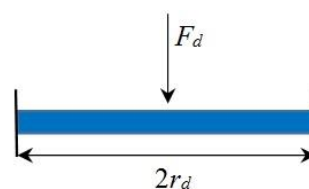
انرژی لایه‌لایه شدن  $E_d$  با ضرب نرخ آزادسازی انرژی بحرانی در مد دوم ( $G_{II}$ ) با سطح شکست ظاهراً دایره به دست می‌آید:

$$E_d = G_{II} \pi r_d^2 \quad (37)$$

پارامتری که به صورت مجازی تغییر می‌کند، شعاع  $r_d$  است. بنابراین، کار مجازی نیروی خارجی، تغییر مجازی انرژی کرنش و



(الف)



شکل ۴. ورق دایره‌ای تحت بار متمرکز

برای مقایسه و اعتبارسنجی از نتایج تجربی پل و همکاران [۱] که در دو محدوده سرعت برخورد؛ یعنی نزدیک سرعت حد بالستیک و بالاتر از آن به دست آمده استفاده می‌شود. نانوذرات رس با درصدهای وزنی صفر، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ نسبت به وزن کل رزین پایه و سفت‌کننده، به طور مکانیکی مخلوط و سپس با سرعت بالا همزده شده‌اند. مخلوط حاصل با استفاده از دستگاه آلتراسونیک سونیک شده و بعد از آن در آن خلا حباب‌زدایی شد. نمونه‌ها از ۱۲ لایه پارچه بافته شده دوبعدی شیشه به صورت متقارن و اپوکسی تقویت شده با نانوذرات رس، به روش لایه‌چینی دستی تهیه شده‌اند [۱]. مشخصات پرتابه، هدف و خواص مکانیکی ورق‌های نانوکامپوزیت در جدول ۱ و ۲ ارائه می‌شود. ورق‌های نانوکامپوزیت ساخته شده دارای درصد وزنی الیاف ۵۰ درصد و ضخامت ۲/۶ میلی‌متر می‌باشند [۱].

تحقیقات مختلفی برای بررسی اثر نرخ کرنش روی رفتار مواد مرکب چندلایه تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا انجام شده است. محققان مشاهده کردند که خواص مکانیکی مواد کامپوزیت و نانوکامپوزیت در بارگذاری شبه‌استاتیک در مقایسه با خواص مکانیکی در بارگذاری دینامیک سرعت بالا افزایش می‌یابد. به خصوص، در بارگذاری ضربه سرعت بالا، مواد سفتی و استحکام بالاتری به دلیل حساسیت نرخ کرنش تجربه می‌کنند [۱۸-۱۹]. بنابراین، در این پژوهش اثر نرخ کرنش بر استحکام و مدول الاستیک در هر لایه را می‌توان با استفاده از عبارت زیر بیان کرد [۲۰-۲۲]:

$$\{S_{RT}\} = \{S_0\} \left( 1 + C_1 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (36)$$

$$\{E_{RT}\} = \{E_0\} \left( 1 + C_{2,3} \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (37)$$

که در آن  $\{E_{RT}\}$  بردار مدول مؤثر در نرخ کرنش  $\dot{\epsilon}$  و  $\{E_0\}$  بردار مدول شبه‌استاتیک در نرخ کرنش شبه‌استاتیک  $\dot{\epsilon}_0$  است،  $C_{2,3}$  ثابت‌های نرخ کرنش ( $C_2$  ثابت طولی،  $C_3$  ثابت برشی) هستند که مقادیر محدوده  $C_2$  و  $C_3$  از [۱۹-۲۰] گرفته شده است.

نرخ کرنش در بازه زمانی نام به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{\Delta \epsilon_{xi}}{\Delta t} = \frac{\epsilon_{xi} - \epsilon_{xi-1}}{\Delta t} \quad (38)$$

با استفاده از معادلات ۳۶ و ۳۷ اثر نرخ کرنش بر روی مدول الاستیسیته و استحکام به دست می‌آید. همچنین یک پراکنندگی قابل توجه در مورد کرنش شکست وجود دارد. محققان ضرایب

همچنین، این منطقه از لایه‌لایه شدگی در لایه‌های پایین به طور کامل دایره‌ای نیست. چون شعاع لایه‌لایه شدن در هر یک از لایه‌های شکست شده ثابت می‌ماند و مقاومت برشی بین‌لایه‌ای در لایه‌های باقیمانده کاهش می‌یابد؛ شعاع لایه‌لایه شدن در لایه‌های پایین‌تر بزرگتر از لایه‌های بالاتر است. بنابراین، ضریب تصحیح (C.C) منطقه لایه‌لایه شدن نسبت به سطح شکست دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود. همچنین انرژی لایه‌لایه شدن برابر است با:

$$E_d = (C.C)(\pi r_d^2) G_{II} \quad (31)$$

### ۲-۷. تعادل انرژی پرتابه

با محاسبه انرژی جنبشی اولیه پرتابه و انرژی‌های جذب شده در طی بازه زمانی  $i$  ام، می‌توان سرعت پرتابه را با استفاده از تعادل انرژی پرتابه برای بازه زمانی  $i$  ام به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$KE_{p0} = KE_{pi} + E_{Li} + KE_{Lmi} \quad (32)$$

بعد از قراردادن روابط ۱، ۲ و ۳ در رابطه ۳۲ و ساده‌سازی، رابطه زیر برای سرعت انتهای فاصله زمانی  $i$  ام به دست می‌آید:

$$V_i^2 = \frac{m_p V_s^2 - 2(E_{fi} + E_{mi} + E_{bi} + E_{di})}{(2M_{ci} + m_p)} \quad (33)$$

با محاسبه سرعت پرتابه، پارامترهای متفاوتی مانند جابه‌جایی پرتابه، کرنش، نیروی تماسی و انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف برای بازه‌های داده شده به دست می‌آیند. فاصله طی شده توسط پرتابه و جابه‌جایی مرکز ورق نانوکامپوزیت در بازه زمانی  $i$  ام به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\delta_{0i} = V_i \times \Delta t$$

$$\Delta Z_i = \sum_{N=1}^{N=i-1} \delta_{0N-1} \quad (34)$$

همچنین نیروی تماس یا مقاوم در برابر حرکت پرتابه می‌تواند توسط رابطه زیر محاسبه شود:

$$F_i = m_p d_{ci} \quad (35)$$

### ۳. نتایج و بحث

با استفاده از مدل تحلیلی و به کارگیری نرم‌افزار ریاضی میپل، پارامترهای سرعت خروجی پرتابه، انرژی جذب شده توسط موده‌های مختلف شکست، نیروی تماسی و شعاع ناحیه لایه‌لایه شدن برای بازه‌های مختلف در طی فرایند نفوذ محاسبه می‌شود.

مختلفی در محدوده ۰/۶ تا ۲/۲ برای کامپوزیت‌های شیشه‌ای با پارچه بافته‌شده ارائه نموده‌اند [۱۸]. در این مطالعه، مقادیر کرنش شکست پس از اعمال ضرایب مورد نظر در سرعت‌های نزدیک و بالاتر از سرعت حد بالستیک به دست می‌آیند (جدول ۳). نتایج سرعت خروجی پرتابه برای نمونه‌های مختلف در دو محدوده سرعت برخورد؛ یعنی نزدیک سرعت حد بالستیک و بالاتر از سرعت حد بالستیک در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج تئوری سرعت خروجی پرتابه و نتایج تجربی پل [۱] در تمامی نمونه‌ها و سرعت‌های برخورد دیده می‌شود. با توجه به نتایج در جداول ۲-۴، خواص مکانیکی و بالستیکی فقط در نمونه نانوکامپوزیت ۳ درصد وزنی نسبت به نمونه کامپوزیت بدون نانورس بهبود یافته است. سایر نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی، وجود نانورس تأثیر چندانی بر بهبود نتایج ندارد. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد کاهش خواص مکانیکی و بالستیکی نمونه‌های بالاتر از ۳ درصد دلالت زیر را می‌تواند داشته باشد:

۱. تشکیل حباب‌های هوا در مخلوط طی عملیات اختلاط به دلیل ویسکوزیته بالای آن خصوصاً در مقادیر بالای نانوذرات رسی
۲. کلوخه‌ای شدن نانوذرات رس در رزین به دلیل پراکندگی ضعیف
۳. وجود تمرکز تنش بالا در مرز مشترک نانوذرات رس و ماتریس
۴. اثر فرایند پخت متفاوت بر ساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت

۵. اثر نرخ کرنش بر خواص دینامیکی و بالستیک

به دلایل ذکر شده، تحت بارگذاری کششی، ترک‌ها از نواحی ضعیف نمونه شروع به رشد کرده و در نتیجه استحکام و کرنش شکست اپوکسی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه کیفیت پراکندگی نانوذرات و همچنین وجود گاز در رزین تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی و بالستیکی دارد، از اینرو مخلوط کردن و گاززدایی مناسب رزین تقویت‌شده با نانورس از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا از یک مقدار درصد وزنی به بعد، هرچه مقدار ذرات نانو رس افزایش پیدا می‌کند، استحکام نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد. بنابراین اگر مقدار نانو ذرات رس پخش شده در زمینه پلیمری مناسب باشد، وجود این ذرات نانو سبب کاهش تحرک سطح مشترک الیاف شیشه و ماتریس پلیمری می‌شود. این امر باعث

انتقال بهتر تنش به الیاف شیشه و در نتیجه افزایش استحکام نانوکامپوزیت می‌شود. لذا با توجه به وابستگی مدل تحلیلی حاضر به خواص مکانیکی و دینامیکی نمونه‌های تهیه شده، کاهش خواص بالستیک پیش‌بینی شده در جدول ۴، برای نمونه‌های نانوکامپوزیت بالاتر از ۳ درصد وزنی نانورس با نتایج تجربی تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

با توجه به رابطه تحلیلی ۱۵، انرژی جذب‌شده توسط محدوده تغییر شکل غیرخطی از دو بخش تشکیل شده که بخش اول بیانگر انرژی خمشی و بخش دوم نشان‌دهنده انرژی غشایی است. لذا به کمک این مدل تحلیلی علاوه بر انرژی غشایی، اثر انرژی خمشی روی سرعت بالستیک بررسی می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات انرژی جذب‌شده توسط خمش و کشیدگی ورق نانوکامپوزیت در درصدهای مختلف نانو رس را در سرعت نزدیک سرعت حد بالستیک و بالاتر از آن را بر حسب زمان نشان می‌دهند. همچنین شکل ۸ انرژی تغییر شکل غیرخطی، مجموع انرژی جذب‌شده توسط خمش و کشیدگی ورق نانوکامپوزیت را در سرعت نزدیک سرعت حد بالستیک و بالاتر از آن را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در هر دو محدوده سرعت در ۱۰ میکروثانیه ابتدایی مقدار انرژی خمشی تمام نمونه‌های نانوکامپوزیت ناچیز و تقریباً صفر است. سپس با گذر زمان، انرژی خمشی افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۷، در هر دو محدوده سرعت در ۲۰ میکروثانیه ابتدایی مقادیر انرژی غشایی ناچیز و تقریباً صفر است. لذا با مقایسه مقادیر انرژی خمشی و غشایی در ۲۰ میکروثانیه ابتدایی، مشاهده می‌شود اثر تغییر شکل و انرژی خمشی در فرایند نفوذ مؤثرتر از تغییر شکل و انرژی غشایی است. با گذر زمان انرژی غشایی افزایش می‌یابد و مقادیر آن با شیب بیشتری نسبت به انرژی خمشی افزایش می‌یابد. در نتیجه در انتهای فرایند نفوذ، انرژی غشایی هر نمونه نانوکامپوزیت از انرژی خمشی بیشتر می‌شود. به‌طور کلی از مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که نسبت مقادیر انرژی خمشی به مقادیر انرژی غشایی در درصدهای مختلف نانورس در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد است؛ لذا در محاسبه سرعت خروجی پرتابه قابل صرف‌نظر نمی‌باشد.

در مطالعه حاضر، چون در معادله ۱۷ انرژی خمشی و غشایی به ترتیب به توان دوم تغییر شکل مرکز ورق بستگی دارند؛ تغییرات انرژی جذب‌شده توسط محدوده تغییر شکل غیرخطی، ب وجود



درصد از سایر نمونه‌های نانوکامپوزیتی کمتر است. در نتیجه بیشترین تغییر شکل عرضی و انرژی جذب‌شده در محدوده تغییر شکل غیرخطی و کمترین سفتی را نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی از خود نشان می‌دهد (شکل ۸).

افزایش شعاع موج الاستیک عرضی همراه با گذر زمان، وابستگی کمتری به آن دارد. بنابراین نمونه‌های دارای تغییر شکل زیاد، انرژی خمشی و غشایی بیشتری دارند. در بین نمونه‌های نانوکامپوزیت، مطابق جداول ۲ و ۳، خواص مکانیکی نمونه ۱۰

جدول ۱. مشخصات پرتابه و هدف [۱]

مشخصات پرتابه		مشخصات هدف
جرم پرتابه (گرم)	۸/۹	
قطر پرتابه (میلی‌متر)	۱۰	ضخامت (میلی‌متر)
شکل پرتابه	استوانه‌ای سرتخت	تعداد لایه‌ها
		بازه زمانی (میکروثانیه)
		ضریب اصلاح ناحیه ورقه‌ورقه شدن
		نرخ کرنش شبه استاتیک
		ضریب انتقال موج تنش
		نرخ رهایی انرژی کرنشی مد دوم (ژول بر متر مربع)
		استحکام برش بین لایه‌ای (مگاپاسکال)

جدول ۲. خواص مکانیکی نانومواد کامپوزیت در بارگذاری شبه‌استاتیک [۱]

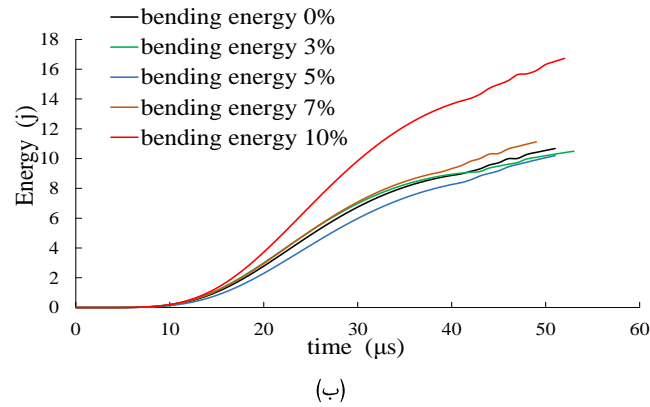
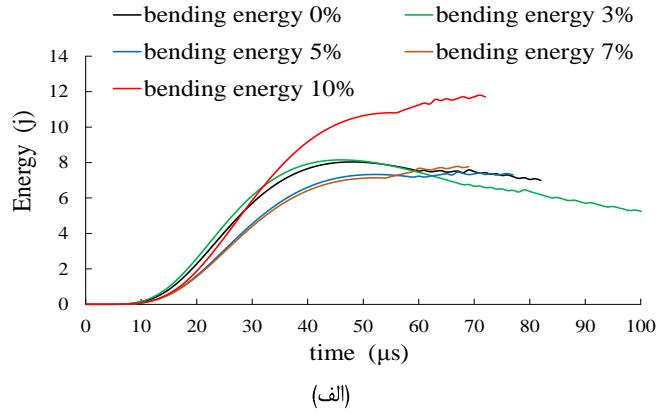
نانورس (درصد)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	کرنش شکست (درصد)	مدول برشی (گیگاپاسکال)	چقرمگی شکس (کیلوژول بر متر مکعب)
۰	۱۹۰۷	۸/۲	۱/۸	۲/۵	۱/۳
۳	۱۹۲۵	۹/۲	۲	۳	۱/۹
۵	۱۹۳۷	۷/۸	۱/۹	۲/۵	۱/۴
۷	۱۹۵۰	۸/۲	۱/۷	۲/۸	۱/۱
۱۰	۱۹۶۹	۳/۵	۱/۷	۱/۷	۰/۵

جدول ۳. اثر نرخ کرنش بر روی کرنش شکست نانومواد کامپوزیت

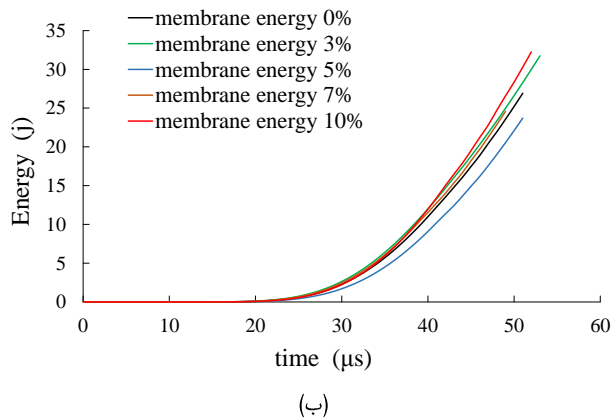
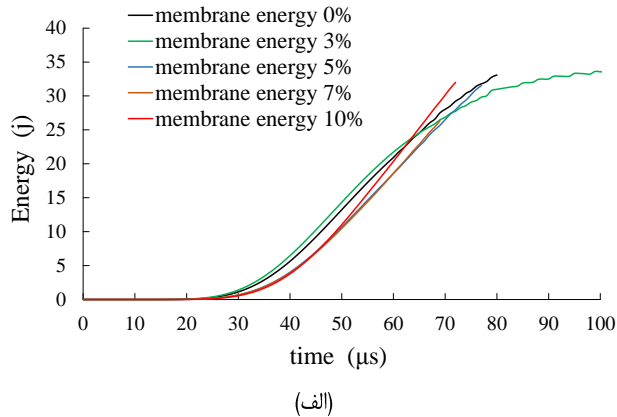
نانورس (درصد)		۰	۳	۵	۷	۱۰
کرنش شکست (درصد)	نزدیک سرعت حد بالستیک	۲/۲۵	۲/۵	۲/۳	۲	۲/۱
	بالتر از سرعت حد بالستیک	۱/۹۵	۲/۰۵	۱/۹۵	۱/۸۰	۲

جدول ۴. مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی سرعت خروجی پرتابه

محدوده سرعت (متر بر ثانیه)	نانورس (درصد)	نتایج تجربی [۱]	نتایج تحلیلی
نزدیک سرعت حد بالستیک (۱۳۴)	۰	۴۶/۸	۴۵/۱۸
	۳	۲۵/۳	۲۶/۸۶
	۵	۶۰/۸	۵۹/۰۸
	۷	۷۳/۶	۷۲/۴۰
	۱۰	۶۵/۴	۶۵/۰۷
بالتر از سرعت حد بالستیک (۱۶۹)	۰	۱۱۹/۵	۱۱۸/۴۶
	۳	۱۱۳/۸	۱۱۰/۸۱
	۵	۱۲۸/۷	۱۲۴/۰۹
	۷	۱۲۳/۴	۱۲۱/۷۸
	۱۰	۱۰۶/۷	۱۱۱/۵۸



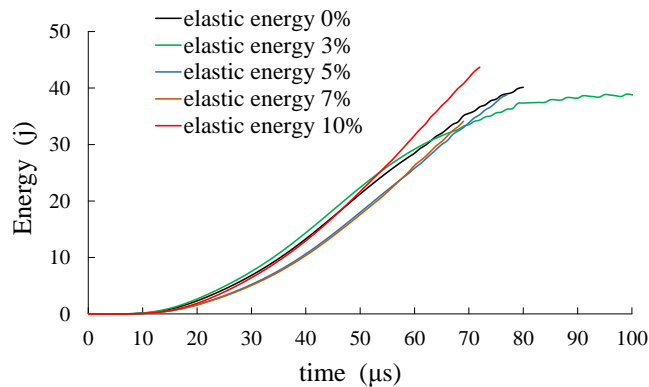
شکل ۶. تغییرات انرژی خمشی در درصدهای مختلف بر حسب زمان؛ الف) سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، ب) سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه



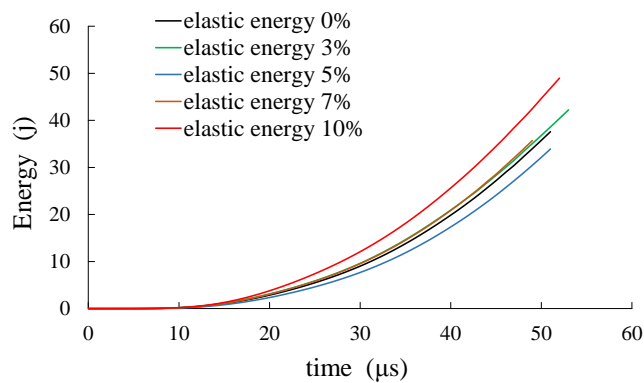
شکل ۷. تغییرات انرژی غشایی در درصدهای مختلف بر حسب زمان؛ الف) سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، ب) سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه

هم در سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه بیشتر از زمان نفوذ در سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه است. چون نرخ افزایش جابه‌جایی کل پرتابه در ابتدای برخورد بالستیک با سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه کاهش کمتری با زمان دارد، جابه‌جایی پرتابه با این سرعت، در ابتدای برخورد بالستیک تقریباً خطی و در انتهای برخورد بالستیک غیرخطی است که در شکل الف-۹ نشان داده شده است. لذا تعداد بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده، کاهش نرخ افزایش جابه‌جایی را کمتر در ابتدای نمودار تغییرات جابه‌جایی برحسب زمان نشان می‌دهد. اما هرچه به انتهای فرایند نفوذ نزدیک می‌شویم، نرخ افزایش جابه‌جایی کل پرتابه در این سرعت با زمان کاهش شدیدتری می‌یابد و نمودار جابه‌جایی پرتابه با زمان تغییرات بیشتری دارد.

شکل ۹ تغییرات تغییرشکل مرکز ورق برحسب زمان برای سرعت‌های نزدیک سرعت حد بالستیک و بالاتر از آن را نشان می‌دهد. در هر دو محدوده سرعت، تغییر شکل مرکز ورق نمونه ۱۰ درصد از سایر نمونه‌ها بیشتر است که با نتایج انرژی جذب‌شده در محدوده تغییر شکل غیرخطی هم توافق خوبی دارد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با گسترش موج عرضی به مرور زمان و به‌واسطه کاهش سرعت و شتاب کاهنده پرتابه، جابه‌جایی پرتابه در بازه زمانی  $t$  ام کاهش دارد، اما جابه‌جایی کل پرتابه تا بازه زمانی  $t$  ام به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد. همچنین زمان نفوذ در سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه بیشتر از زمان نفوذ در سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه است. لذا تعداد بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده



(الف)



(ب)

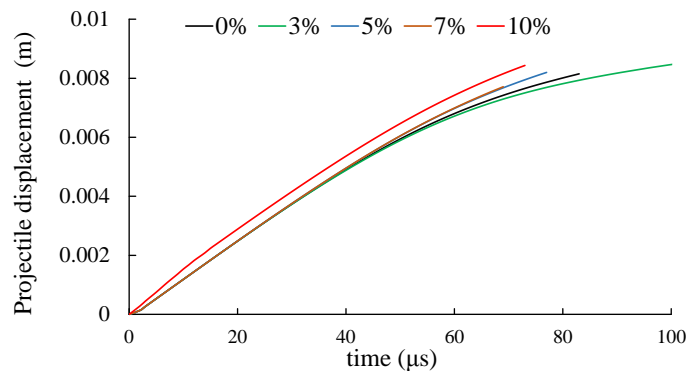
شکل ۸. تغییرات انرژی الاستیک در درصدهای مختلف بر حسب زمان؛ الف) سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، ب) سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه

به‌دلیل نفوذ سریع‌تر و کاهش تعداد بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده، در انتهای فرایند نفوذ تغییرات نمودار جابه‌جایی پرتابه با زمان خطی است. شکل ۱۰ تغییرات انرژی شکست در درصدهای مختلف نانو رس در سرعت نزدیک سرعت حد بالستیک و بالاتر از آن را برحسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰

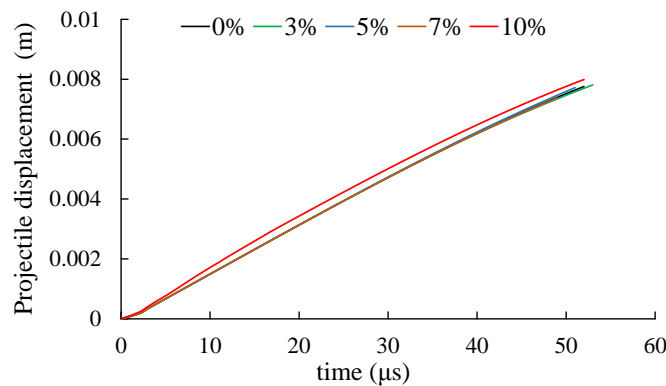
مشابه برخورد بالستیک با سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، جابه‌جایی پرتابه با زمان در سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه در ابتدای برخورد بالستیک تقریباً خطی است که در شکل ب-۹ نشان داده شده است. هرچند نرخ افزایش جابه‌جایی کل پرتابه در این سرعت با زمان کاهش کمتری نسبت به سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه دارد، اما

مراجعه به خواص مکانیکی شبه استاتیک در جدول ۲ و ۳، مشاهده می‌شود که مدول الاستیسیته و برشی نمونه ۳ درصد نسبت به نمونه صفر درصد افزایش یافته است و سایر نمونه‌ها تقریباً با کاهش خواص اشاره شده مواجه‌اند. این مقادیر از پارامترهای مهم در مدل تحلیلی حاضر برای محاسبه انرژی شکست می‌باشند.

می‌توان مشاهده کرد، چون نمونه ۳ درصد مطابق نتایج تجربی هم استحکام بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد و هم کرنش شکست بالاتری را تحمل می‌کند، بیشترین سهم جذب انرژی شکست مربوط به نمونه ۳ درصد است. با توجه به رابطه ۲۱ مشاهده می‌شود که مقدار انرژی شکست به مدول الاستیسیته، کرنش شکست و گسترش موج عرضی الاستیک وابسته است. با



(الف)



(ب)

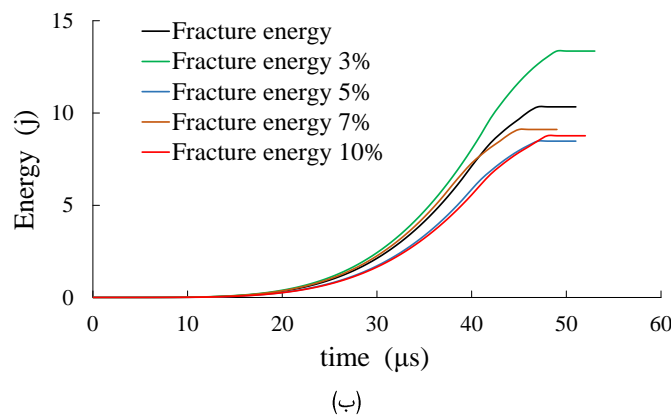
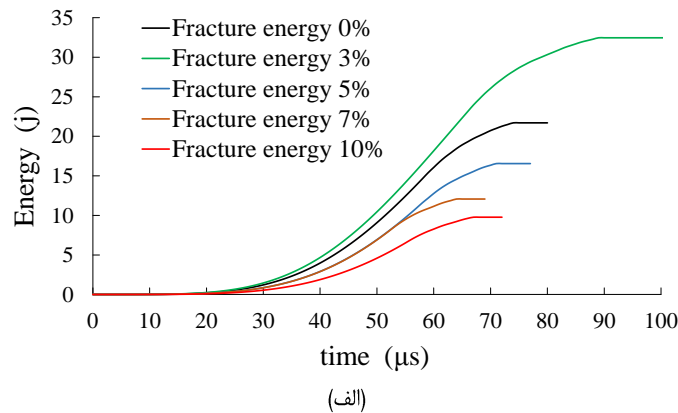
شکل ۹. جابه‌جایی مرکز ورق بر حسب زمان؛ (الف) سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، (ب) سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه

نیست و تمام لایه‌ها شکست می‌شوند و فرایند نفوذ به پایان می‌رسد، شعاع لایه‌لایه شده در سرعت ضربه ۱۳۴ متر بر ثانیه بیش از شعاع لایه‌لایه شده در سرعت ضربه ۱۶۹ متر بر ثانیه است (شکل ۱۱ و جدول ۵)؛ که با نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی دارد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود در هر دو محدوده سرعت، در ابتدا شعاع لایه‌لایه شدن به یک مقدار ثابت رسیده و سپس با افزایش نیروی تماس تا پایان نفوذ کامل گام به گام افزایش می‌یابند. همچنین با مراجعه به روابط تحلیلی محاسبه شعاع لایه‌لایه شدگی، یعنی معادله ۳۰، مشخص می‌شود که شعاع ناحیه لایه‌لایه شدگی با استحکام برش بین لایه‌ای رابطه معکوس

همچنین با فرض خطی بودن منحنی تنش و کرنش و افزایش شیب منحنی تنش و کرنش، موج عرضی الاستیک نمونه ۳ درصد از سایر نمونه‌ها بیشتر است. علاوه بر این، با مراجعه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود که اثر نرخ کرنش بر کرنش شکست، فقط در نمونه ۳ درصد کاملاً مشهود است و در سایر نمونه‌ها به‌طور کلی کاهش یافته است. همان‌گونه که در بخش قبلی بیان شده است، اگر نیروی تماس در هر زمان بالاتر از بار بحرانی لایه‌لایه شدن شود، آسیب لایه‌لایه شدگی رخ می‌دهد. نتایج مدل تحلیلی نشان می‌دهد چون در سرعت ضربه بالاتر از سرعت حد بالستیک زمان کافی برای انتشار در هدف نانوکامپوزیت چندلایه

شعاع یا قطر لایه‌لایه شدگی در سرعت‌های بالاتر کاهش خواهد یافت.

دارد. استحکام برش بین‌لایه‌ای در سرعت‌های بالاتر به دلیل افزایش نرخ کرنش و استفاده از رابطه ۳۴ افزایش می‌یابد. بنابراین



شکل ۱۰. تغییرات انرژی شکست در درصدهای مختلف بر حسب زمان؛ الف) سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، ب) سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه

جدول ۵. مقایسه نتایج تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی شعاع ناحیه لایه‌لایه شدن

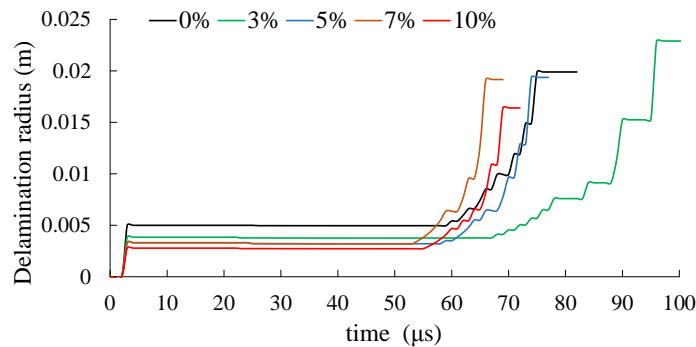
شعاع ناحیه لایه‌لایه شدن (میلی‌متر)		نانورس (درصد)	محدوده سرعت (متر بر ثانیه)
نتایج تحلیلی	نتایج تجربی [۱]		
۱۹/۸۹	۲۰/۸۶	۰	نزدیک سرعت حد بالستیک (۱۳۴)
۲۲/۹۱	۲۱/۹۳	۳	
۱۹/۳۷	۲۰/۴۲	۵	
۱۹/۰۸	۱۹/۷۲	۷	
۱۶/۴۰	۱۵/۸۴	۱۰	
۱۶/۳۳	۱۴/۸۱	۰	بالاتر از سرعت حد بالستیک (۱۶۹)
۱۶/۳۷	۱۶/۳۹	۳	
۱۵/۰۲	۱۴/۱۹	۵	
۱۶/۰۷	۱۴/۵۶	۷	
۱۷/۴۹	۱۶/۶۰	۱۰	

#### ۴. نتیجه‌گیری

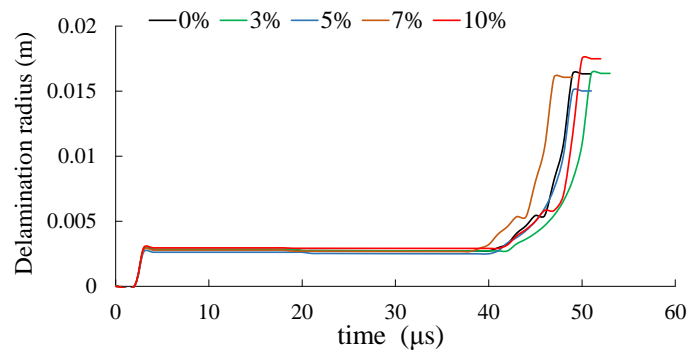
ناحیه آسیب، نیروی تماس و انرژی جذب‌شده توسط سازوکارهای گوناگون برای بازه‌های مختلف زمانی توسعه داده شد. چهار ناحیه

در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای محاسبه سرعت خروجی پرتابه، جابه‌جایی پرتابه، تغییرات کرنش و تنش در هدف، مساحت

برای شکست، تغییر شکل غیرخطی، لایه‌لایه شدن و محدوده تغییر شکل نیافته در حین برخورد بالستیک در اهداف نانوکامپوزیتی در نظر گرفته شد. نتایج نهایی به صورت زیر قابل ارائه است:



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. تغییرات شعاع لایه‌لایه شدن در درصدهای مختلف بر حسب زمان؛ (الف) سرعت ۱۳۴ متر بر ثانیه، (ب) سرعت ۱۶۹ متر بر ثانیه

۵. سرعت خروجی پرتابه از هدف نانوکامپوزیت چندلایه با دقت بالایی تخمین زده می‌شود و با نتایج تجربی توافق خوبی دارد
۶. بهبود خواص مکانیکی و دینامیکی نمونه‌های نانوکامپوزیت تقویت‌شده با ذرات نانورس منجر به بهبود خواص بالستیک و جذب انرژی آنها می‌شود
۷. شعاع ناحیه آسیب‌دیده با استفاده از تابع تغییر شکل جدید به خوبی پیش‌بینی می‌شود
۸. لایه‌لایه شدن در سرعت‌های ضربه پایین‌تر، دیرتر رخ می‌دهد
۹. قطر لایه‌لایه شدن در سرعت‌های ضربه بالاتر کاهش می‌یابد

۱. با افزایش سرعت برخورد میزان جذب انرژی کاهش می‌یابد
۲. با افزایش سرعت برخورد گسترش ناحیه شکست محدود می‌شود
۳. اثر انرژی خمشی و غشایی در انرژی جذب‌شده توسط ناحیه تغییر شکل غیرخطی قابل توجه است
۴. به کمک روابط تحلیلی، تغییرات کرنش در جهت ضخامت در هر لحظه از زمان قابل حصول است و مقدار نفوذ یا نفوذ کامل را هم می‌توان بررسی کرد

## ۵. مأخذ

[1] M. H. Pol, Gh. H. Liaght, Theoretical And Experimental Investigation of Penetration of Projectile on Composite Material And Experimental Development on Hybrid

Nanocomposite, PHD Thesis, Tarbiat Modares University, IRAN, 2012. (in Persian)  
 [2] A. Mirzapour, M. H. Asadollahi, S. Baghshaei, M. Akbari, Effect of Nanosilica on the Microstructure, Thermal Properties and Bending

- Strength of Nanosilica Modified Carbon Fiber/Phenolic Nanocomposite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 63, pp.159-167, 2014.
- [3] A. Bidi, Gh. Liaghat, Gh. Rahimi, Effect of nano clay addition to energy absorption capacity of steel-polyurea bi-layer, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016. (in Persian)
- [4] I. Mohagheghian, G. J. Mcshane, W. J. Stronge, Impact Response of Polyethylene Nanocomposites, *Int. J. Engineering Procedia*, Vol. 10, pp. 704-709, 2011.
- [5] A. F. Avila, A. S. Netob, H. N. Juniorb, Hybrid Nanocomposites for Mid-range Ballistic Protection, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 38, pp. 669-676, 2011.
- [6] H. Rahimi Sharbaf, G. H. Rahimi, Gh. Liaghat, Experimental study of behavior of filament winding composite pipes with liner using glass fibers and silica nanoparticles under impact loading, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, 2017.(in Persian)
- [7] R. A. W. Mines, A. M. Roach, N. Jones, High velocity perforation behavior of polymer composite laminates, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 561-588, 1999.
- [8] S. S. Morye, P. J. Hine, R. A. Duckett, D. J. Carr, I. M. Ward, Modelling of the Energy Absorption by Polymer Composites upon Ballistic Impact, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 14, pp. 2631-2642, 2000.
- [9] N. K. Naik, P. Shrirao, B. C. K. Reddy, Ballistic Impact Behavior of Woven Fabric Composites: Formulation, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 32, No. 10, pp. 1521-1552, 2006.
- [10] M. H. Pol, Gh. H. Liaght, Investigation of the High Velocity Impact Behavior of Nanocomposites, *Int. J. Polymer Composites*, Vol. 37, Issue 4, pp. 1173-1179, 2016.
- [11] M. H. Pol, Gh. H. Liaghat, E. Zamani, A. Ordys, Investigation of the Ballistic Impact Behavior of 2D Woven Glass/Epoxy/Nanoclay Nanocomposites, *Int. J. Composite Material*, Vol. 49, no. 12, pp. 1449-1460, 2015.
- [12] K. S. Pandya, N. K. Naik, Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of carbon nanotube dispersed resin, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 54, pp. 49-59, 2015.
- [13] L. G. Balaganesan, R. Srinivasan, M., Gupta, N. K. Kanny, Energy Absorption and Ballistic Limit of Nanocomposite Laminates Subjected to Impact Loading, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 74, pp. 57-66, 2014.
- [14] M. Mamivand, Gh. H. Liaghat, A Model for Ballistic Impact on Multi-Layer Fabric Targets, *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 806-812, 2010.
- [15] J. N. Reddy, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis*, London: CRC, Second ed., 2003.
- [16] R. Olsson, Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates, *Composites: Part A: Applied science and manufacturing*, Vol. 32, pp. 1207-1215, 2001.
- [17] S. Abrate, *Impact Engineering of Composite Structures*, Springer Wien NewYork, 2011.
- [18] N. K. Naik, R. K. Venkateswara, High strain rate behavior of woven fabric composites under compressive loading, *International Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 747, pp. 301-311, 2008.
- [19] W. Goldsmith, C. K. Dharan, H. Chang, Quasi-static and ballistic perforation of carbon fibre laminates, *Int J Solids Struct*, Vol. 32, pp. 89-103, 1995.
- [20] L. J. Deka, S. D. Bartus, U. K. Vaidya, Damage evolution and energy absorption of E-glass/polypropylene laminates subjected to ballistic impact, *International Journal of Material Science*, Vol. 43, pp. 4399-4410, 2008.
- [21] F. Y. Chian, A ballistic material model for continuous-fiber reinforced composites, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 46, pp. 11-22, 2012.
- [22] I. M. Daniel, B. T. Werner, J. S. Fenner, Strain-rate-dependent failure criteria for composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 71, Issue 3, pp. 357-364, 2011.

---

1. electro-spun