



بررسی تئوری و تجربی تأثیر نانوذرات رسی بر روی خواص بالستیکی مواد مرکب شیشه/اپوکسی

محمد حسین پل^{۱*}، غلامحسین لیاقت^۲، احسان زمانی^۳

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* تفرش، صندوق پستی ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، m_h_pol@tafreshu.ac.ir

چکیده- در این مقاله، تأثیر نانوذرات رسی بر روی رفتار بالستیکی مواد مرکب چند لایه شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی به‌طور تئوری و تجربی بررسی می‌شود. نانومواد مرکب هیبریدی از جنس شیشه/اپوکسی/نانورس بوده و با روش لایه‌چینی دستی تحت فشار ساخته شد. همچنین نانورس با درصد وزنی ۰، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ نسبت به مجموعه رزین (اپوکسی-نانورس) درون سیستم اپوکسی پخش شد. مقایسه نتایج آزمایش‌های بالستیکی و نتایج تئوری ارائه شده، نشان دهنده دقت خوب محاسبات تئوری است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، بیشترین افزایش خواص بالستیکی با افزودن ۳ درصد وزنی نانورس به مقدار ۱۰ درصد بدست می‌آید، در حالی که بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت‌های نسبتاً بیش از حد بالستیک به مقدار ۲۰ درصد با افزودن ۱۰ درصد نانورس بدست می‌آید.

کلیدواژه‌گان: نانومواد مرکب پلیمری، خواص بالستیکی، خواص مکانیکی، نانورس.

Effect of nanoclay particles on ballistic behavior of composites- Theoretical and experimental investigation

M. H. Pol^{1*}, G. H. Liaghat², E. Zamani³

1- Assis. Prof., Mech. Eng., Tafresh Univ., Tafresh, Iran.

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

3- Assis. Prof., Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran

* P. O. B. 39518- 79611 Tafresh, Iran. m_h_pol@tafreshu.ac.ir

Abstract- In this paper, the influence of nanoclay Cloisite 30B on ballistic impact behavior of 2D woven E-Glass/Epoxy laminated composite has been investigated Theoretical and experimentally. The structure of the hybrid nanocomposite is glass/epoxy/nanoclay laminate and is manufactured by hand layup method under pressure. The nanoclay is dispersed into the epoxy system in a 0%, 3%, 5%, 7% and 7% ratio in weight with respect to the matrix. Comparison of theoretical results and results of the ballistic impact test are shown a good correlation. The results have shown that Maximum to increase in energy absorption is 10% in 3% nanoclay content. However, in the impact velocities far than ballistic impact, maximum increasing in energy absorption is 20% in 10% nanoclay content.

Keywords: Polymer-Matrix Nanocomposites (Pmcs), Impact Behavior, Ballistic Behavior, Mechanical Property, Nanoclay.

به‌طور وسیع مورد توجه قرار گرفته است. فلزات به‌عنوان مواد سنتی به‌دلیل قیمت کم در ساخت سپرهای حفاظت شخصی و تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما معمولاً این مواد بازده

۱- مقدمه

رفتار مواد در حالت دینامیک برخورد سرعت بالا به‌دلیل کاربردهای زیاد در علوم فضایی و نظامی در سال‌های اخیر

درصد وزنی نانورس کلوسیدسی بی را گزارش می‌دهند. پل و همکاران [۸] تأثیر نانوذرات رسی کلوسیدسی بی بر روی ماده مرکب الیاف شیشه/اپوکسی ساخته شده با روش تزریق به کمک خلاء را در درصدهای وزنی ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ نانورس بررسی کردند. طبق نتایج این بررسی، بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت برخورد نزدیک حد بالستیک در ۵ درصد وزنی نانورس و در سرعت‌های نسبتاً بالاتر در بیش از ۷ درصد وزنی بدست می‌آید.

از طرفی برای مدل‌سازی فرایند نفوذ پرتابه‌ها در اهداف ساخته شده از مواد مرکب، تحقیقات مختلفی انجام شده است. در این تحقیقات مکانیزمهای جذب انرژی مختلفی مانند شکست کششی الیاف، تغییر شکل الیاف ثانویه، انرژی جنبشی مخروط تشکیل شده در پشت صفحه هدف، لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب، ترک خوردن ماتریس، برش پلاک و اصطکاک در طی فرایند نفوذ معرفی می‌شوند. در این میان کانتول و مورتون [۹] نتیجه گرفتند که انرژی جذب شده توسط شکست کششی الیاف اولیه در مواد مرکب ساخته شده با الیاف شیشه و کربن دارای اهمیت کمتری نسبت به انرژی جذب شده توسط الیاف ثانویه دارد. در حالی که ژو و همکارانش [۱۰] و همچنین زی و هسیه [۱۱] اهمیت این مکانیزم جذب انرژی را برای مواد مرکب ساخته شده با الیاف ترموپلاستیک نشان دادند.

موریه و همکارانش [۱۲] به‌طور تحلیلی و تجربی انرژی جذب شده توسط مواد مرکب پلیمری بر اثر برخورد بالستیک بررسی کردند. آنها سه مکانیزم مهم در جذب انرژی پرتابه توسط اهداف ساخته شده از مواد مرکب شامل انرژی جذب شده توسط شکست کششی الیاف اولیه، انرژی جذب شده توسط تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه و انرژی جنبشی منتقل شده به مخروط تشکیل شده در پشت هدف، را در نظر گرفتند.

نیک و همکارانش [۱۳] یک مدل تحلیلی برای تحلیل فرایند برخورد بالستیک با محاسبه مؤلفه‌های مهم جذب انرژی پرتابه که بیشتر توسط محققین دیگر معرفی شده بود، ارائه دادند. تحلیل آنها با در نظر گرفتن مؤلفه‌های جذب انرژی مانند 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 مؤلفه‌های کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط هر یک از این مکانیزم‌ها در طول مدت هر یک از این

پائینی نسبت به وزن دارند. یک راه حل مناسب برای این مشکل استفاده از مواد مرکب و نانومواد مرکب ساخته شده از الیاف به همراه رزین پلیمری به دلیل نسبت مقاومت و سختی به وزن بالای آنان (نسبت به فلزات) است. به همین دلیل در چند دهه اخیر تحقیقات فراوانی جهت بررسی خواص بالستیکی این مواد بصورت تجربی، تئوری و عددی انجام شده است.

با وجود این که خواص مکانیکی مواد مرکب و نانو مواد مرکب ساخته شده با الیاف شیشه وابستگی شدیدی به نرخ کرنش خرابی و رفتار ماتریسشان دارد، به دلیل قیمت نسبتاً پایین، شکل‌پذیری و چقرمگی بالا یک گزینه مناسب برای کاربردهای حفاظت بالستیکی می‌باشند [۱]. یک راه حل مناسب برای حل این مشکل بهبود چقرمگی ماتریس با افزودن نانوذرات است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزودن مقداری نانوذرات می‌توان خواص مکانیکی همچون سختی، چقرمگی شکست، مقدار جذب انرژی برخورد و میرایی ارتعاشات مواد مرکب را بهبود داد. از طرفی دیگر جذب انرژی برخورد یک نانوماده 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]. یاسمین و همکارانش [۳] یک حداکثر افزایش حدود ۸۰ درصد در مدول الاستیک را هنگام افزودن ۱ درصد تا ۱۰ وزنی کلوسیدسی بی^۱ در اپوکسی گزارش می‌دهند. در همین حال هو و همکارانش [۴] افزایش سختی و چقرمگی را هنگام استفاده از نانوذرات گزارش می‌دهند. لین و همکارانش [۵] نیز یک افزایش ۳۰ درصدی در مقاومت برخورد را هنگام استفاده از کلوسیدسی بی در ۵۰ درصد وزنی در رزین اپوکسی گزارش می‌دهند.

تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت در برابر ضربه نانومواد مرکب و نانومواد مرکب هیبریدی بیشتر در حالت بارگذاری نیمه استاتیکی و برخورد سرعت پائین است. اودین و سان [۶] نشان دادند که چقرمگی شکست درون لایه‌ای و مقاومت به ضربه نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی تک راستا با افزایش نانوذرات سلیکا بهبود می‌یابند. آویلا و همکارانش [۷] تأثیر کلوسیدسی بی را بر روی مقدار جذب انرژی نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی در برخورد سرعت پائین بررسی کردند. آنان افزایش ۱۵ تا ۴۸ درصدی در مقدار جذب انرژی با افزودن ۵

1. Closite 30B

ساخته شده دارای درصد وزنی الیاف ۵۰ درصد نسبت به رزین و ضخامت متوسط $2/6\text{mm}$ می‌باشد.

۲-۲- آزمایش‌های بالستیک

آزمایش‌های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از تفنگ گازی انجام گرفته شد. هنگام آزمایش هر یک از صفحات هدف درون یک نگه‌دارنده به ابعاد $150 \times 150\text{mm}^2$ به‌طور ثابت قرار گرفت. یک استوانه فولادی سر تخت بطول 30mm ، قطر 10mm و جرم $8/9\text{gr}$ به عنوان پرتابه در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سرعت‌های برخورد 134m/s و 169m/s بوده و هر دو سرعت‌های اولیه و باقی‌مانده در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد.

۳- تئوری

در طی فرایند نفوذ، انرژی از پرتابه به هدف منتقل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ می‌توان دید در حین نفوذ یک پرتابه سر تخت در اهداف ساخته شده از مواد مرکب، در پشت صفحه هدف یک مخروط تشکیل می‌شود [۱۲، ۱۰]. شکل ۲ طرح‌واره‌ای از مخروط ایجاد شده در پشت صفحه هدف را با فرض مولد خطی نشان می‌دهد.

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. از طرفی دیگر، به جز تارهای اولیه، تمامی تارهایی که در طی فرایند نفوذ تغییر شکل می‌دهند، تارهای ثانویه، مقداری از انرژی پرتابه را در طی تغییر شکل الاستیک خود جذب می‌کنند. علاوه بر مکانیزم‌های جذب انرژی شکست کششی (و یا کشش) الیاف اولیه و تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، مقداری از انرژی پرتابه به این دو گروه از تارها منتقل می‌شود که باعث جابجایی این تارها همراه با پرتابه می‌شود. همچنین در طی فرایند نفوذ، قبل از اینکه لایه‌ای شکسته شود، خرابی ترکیبی از ترک خوردگی ماتریس و لایه‌لایه‌ای شدن ماده مرکب ظاهر می‌شود [۱۳]. هر چند مقدار انرژی جذب شده توسط این دو مکانیزم (بویژه ترک خوردگی ماتریس) کم بوده و قابل صرف‌نظر کردن هستند، اما در انتقال تنش و مقدار جذب انرژی توسط لایه‌های مختلف مؤثر می‌باشند.

جزء‌های زمانی می‌باشد. پل و لیاقت [۱۴] بر پایه تئوری نیک و همکارانش [۱۳] و اصلاح روابط این تئوری، فرایند نفوذ پرتابه‌های سر تخت در اهداف فلزی را با دقت بالاتری تخمین زدند.

مقاله حاضر بخشی از نتایج یک طرح تحقیقاتی در زمینه بررسی تأثیر افزودن نانوذرات بر خواص مکانیکی و به‌ویژه مقاومت بالستیکی ماده مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی تحت برخورد پرتابه‌های سر تخت می‌باشد. در این مقاله، ابتدا نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های بالستیکی نانومواد مرکب شیشه/اپوکسی/نانورس با نتایج تئوری مقایسه شده است. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از تئوری، تأثیر افزودن نانوذرات رسی کلوسیدسی‌بی بر مقاومت بالستیکی ماده مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی تحت برخورد پرتابه سر تخت استوانه‌ای بررسی می‌شود.

۲- آزمایش

۲-۱- اهداف نانومواد مرکب

اهداف از سه جزء الیاف شیشه با دانسیته سطحی 200gr/m^2 ، رزین اپوکسی تشکیل شده از دو بخش اپیون 828 به‌عنوان پایه اپوکسی و سفت کننده جفامین‌دی 400 با نسبت وزنی $55:100$ نسبت به پایه اپوکسی (قسمت اول) و نانوذرات رسی کلوسیدسی‌بی می‌باشد.

ابتدا نانوذرات رس با درصدهای وزنی 0 ، 3 ، 5 ، 7 و 10 نسبت به وزن کل رزین با سفت کننده، جفامین‌دی 400 ، به‌طور مکانیکی مخلوط شده و سپس مخلوط حاصل ابتدا با مخلوط‌کن سرعت بالا با سرعت 6000rpm به مدت 60 دقیقه هم زده شده و سپس با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت 30 دقیقه در دمای 40°C ، توان 150kw/cm^2 و دامنه $5\mu\text{m}$ سونیکت شده و مخلوط بدست آمده به مدت 10 دقیقه در دمای 40°C به‌طور مکانیکی با سرعت 1800rpm با اپیون 828 مخلوط و هم‌زده می‌شود.

پس از ساخت نانورزین، نمونه‌های نانومواد مرکب هیبریدی با 12 لایه الیاف شیشه با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته می‌شوند. پس از لایه‌چینی، پخت نانومواد مرکب هیبریدی در دمای 80°C به مدت 150 دقیقه و به‌دنبال آن در دمای 120°C به مدت 150 دقیقه در اتوکلاو تحت فشار $2/5$ و 4 بار به ترتیب مراحل پخت، صورت می‌گیرد. نانومواد مرکب

که در آن E_{Ci} ، E_{Mi} ، E_{Di} ، E_{Si} ، E_{Pi} به ترتیب انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای شکست کششی الیاف اولیه، تغییر شکل الاستیک الیاف ثانویه، ورقه‌ورق‌های شدن لایه‌ها، شکست و یا ترک خوردگی ماتریس و انتقال انتقال انرژی جنبشی پرتابه به مخروط ایجاد شده در پشت هدف می‌باشند.

فرضیات زیر برای محاسبه کاهش انرژی پرتابه توسط مکانیزمهای مختلف در مدل تحلیلی بر اساس جنس پرتابه، جنس هدف و مشاهدات انجام شده بر روی نمونه‌ها پس از انجام آزمایش‌ها، 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 به‌واسطه 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.

۵- بعد از شکست یک لایه، انرژی جذب شده توسط شکست کششی الیاف اولیه، لایه لایه‌ای شدن و ترک خوردگی ماتریس و همچنین شعاع ناحیه لایه لایه‌ای شدن و ترک خوردگی ماتریس آن لایه ثابت فرض می‌شود.

۴- فرمول‌بندی برای کامپوزیت بافته شده

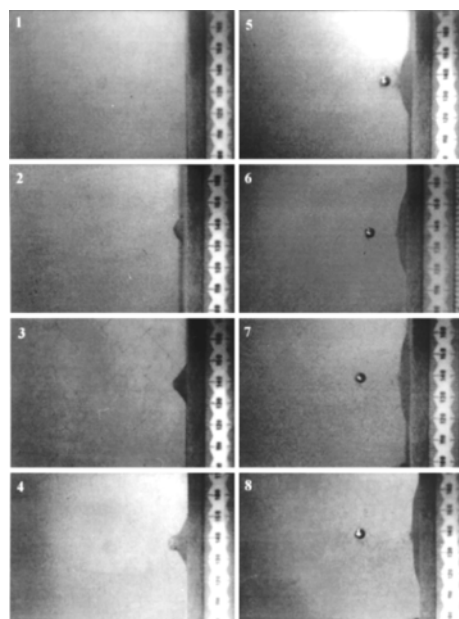
۴-۱- انرژی جذب شده توسط کشش در الیاف اولیه

سرعت گسترش موج الاستیک و موج پلاستیک به ترتیب برابرند با [۱۶]:

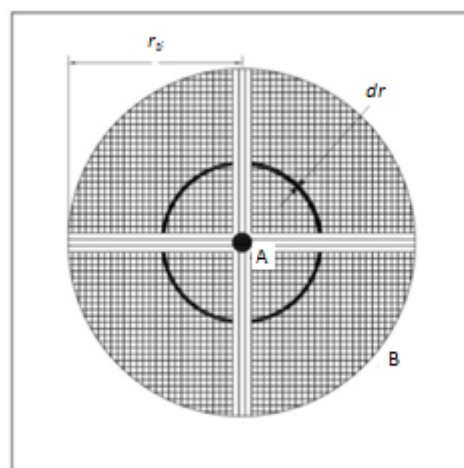
$$c_e = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}} \quad (2)$$

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

هنگامی که جبهه موج کرنشی از یک نقطه تار عبور می‌کند، ماده تار از خارج بسمت محل برخورد حرکت می‌کند (شکل ۳) و تار در پشت موج پلاستیک شبیه یک خیمه وارانه (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



شکل ۱ عکس‌برداری از سطح پشتی هدف (الیاف نایلون ۶۶) تحت برخورد گلوله کروی با سرعت برخورد ۵۱۲m/s [۱۲]



شکل ۲ مخروط ایجاد شده در پشت صفحه هدف

کل انرژی جذب شده توسط پرتابه برابر است با مجموع انرژی جذب شده توسط مکانیزمهای مختلف جذب انرژی خواهد بود. با تقسیم زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک و در نظر گرفتن فرایند نفوذ چند مرحله‌ای، محاسبه مقدار جذب انرژی در طی هر مرحله از جزءهای زمانی و برقراری معادله انرژی، می‌توان سرعت خروجی پرتابه را در انتهای هر مرحله بدست آورد. از این‌رو کل انرژی جذب شده توسط هدف در انتهای فاصله زمانی t برابر است با:

$$E_{Li} = E_{Pi} + E_{Si} + E_{Di} + E_{Mi} + E_{Ci} \quad (1)$$

برابر است با [۱۶]:

$$c_t = \sqrt{\frac{(1 + \varepsilon_p)\sigma_p}{\rho}} - \int_0^{\varepsilon_p} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)} d\varepsilon \quad (4)$$

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

$$r_{ti} = \frac{d}{2} + \sum_{n=1}^{n=i} c_{tn} \Delta t \quad (5)$$

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

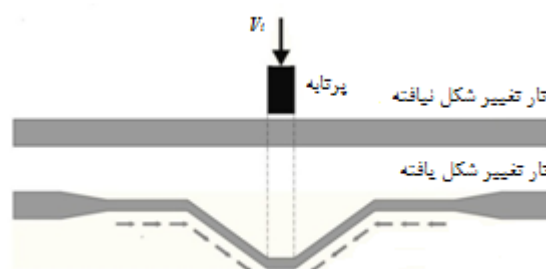
در هر لایه تنش در نقطه برخورد حداکثر است و در طول تار کاهش می‌یابد. مقدار کرنش در طول تار را می‌توان با یک تابع نمایی تخمین زد [۱۳]:

$$\varepsilon_{py} = \varepsilon_0 b^{x/a} \quad (7)$$

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 [۱۳]:

$$\varepsilon'_{0i} = \frac{\frac{d}{2} + \sqrt{\left(r_{ti} - \frac{d}{2}\right)^2 + Z_i^2} + (r_{pi} - r_{ti}) - r_{pi}}{b^{r_{pi}/a} - 1} \quad (8)$$

نتایج تجربی نشان می‌دهد هنگام نفوذ یک پرتابه درون یک ماده مرکب، یک ناحیه نفوذ مخروطی شکل مشاهده می‌شود [۱۹]. این موضوع به دلیل فشرده شدن لایه‌های بالایی در زمان تشکیل مخروط پستی می‌باشد که حاصل آن بیشتر بودن کرنش در لایه‌های بالایی نسبت به لایه‌های پایینی خواهد بود.



شکل ۳ شکل یک تار اولیه قبل و بعد از برخورد

برای اهداف نازک ساخته شده از مواد مرکب تحت برخورد پرتابه کروی، سطح آسیب دیده مخروط ناقصی با قطری برابر با قطر پرتابه در سطح جلویی و زاویه مولد 45° می‌باشد

[۲۱،۲۰].

در اینجا فرض می‌شود که کرنش در لایه پایینی حداقل بوده و از روابط (۷) و (۸) بدست می‌آید و با شیب ثابت در طول ضخامت افزایش می‌یابد. ضریب افزایش کرنش در لایه بالایی (لایه اول) برابر خواهد با:

$$K = \frac{\left(\frac{d}{2} + t\right)^2}{\frac{d^2}{4}} \quad (9)$$

زمانی که یک لایه شکسته می‌شود لایه بعدی، بعنوان لایه مقابل با نفوذ پرتابه، بیشترین کرنش را متحمل خواهد شد.

انرژی جذب شده توسط کشش تارهای اولیه برابر است با:

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

به دلیل این که طول تار دو برابر مسافت طی شده توسط موج طولی بوده و الیاف دارای بافت دو بعدی است، عبارت بالا باید در ضریب چهار ضرب شود.

۴-۲- 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 (۱۱) را برای تغییرات کرنش با فاصله از محل برخورد در فاصله زمانی i خواهیم داشت:

$$\varepsilon_{sy} = \varepsilon_{py} \quad \text{at} \quad r = d/2 \quad (\text{نقطه A}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{sy} = 0 \quad \text{at} \quad r = r_{ti} \quad (\text{نقطه B})$$

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

$$\varepsilon_{syi} = \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} \varepsilon_{pyi} \quad (12)$$

همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، با در نظر گرفتن یک المان حلقه‌ای با شعاع داخلی و بیرونی r و $r+dr$ حجم dV برابر است با:

$$dV = h \left(2\pi r - 8r \sin^{-1} \frac{d}{2r} \right) dr \quad (13)$$

بنابراین انرژی جذب شده در تغییر شکل الیاف ثانویه را می‌توان

از رابطه (۱۴) بدست آورد:

$$E_{Si} = h \int_{\frac{d}{2}}^{r_{ti}} \left(\int_0^{\varepsilon_{syi}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right) \left(2\pi r - 8r \sin^{-1} \frac{d}{2r} \right) dr \quad (14)$$

هدف رخ می‌هد که مقداری از انرژی پرتابه را جذب می‌کند. در تئوری‌های ارائه شده توسط محققان دیگر [۱۸، ۱۷] فرض می‌شود 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 ۲) 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 t ایجاد می‌کند:

$$V_c = V_i \quad \text{at} \quad r \leq d/2 \quad (17)$$

$$V_c = 0 \quad \text{at} \quad r = r_{ti}$$

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

$$V_{ci} = \frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} V_i \quad (18)$$

با در نظر گرفتن یک المان دایره‌ای از مخروط ایجاد شده از نقطه A تا B (شکل ۲)، با شعاع‌های داخلی و خارجی r و $r+dr$ ، جرم این المان و انرژی جنبشی مخروط ایجاد شده را در فاصله زمانی t می‌توان از معادله زیر بدست آورد:

$$dm = h(2\pi r)\rho dr \quad (19)$$

$$E_{Ci} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d^2}{4} \rho h \right) V_i^2 +$$

$$\int_{d/2}^{r_{ti}} \frac{1}{2} (2\pi h \rho r) \left(\frac{2(r_{ti} - r)}{(2r_{ti} - d)} \right)^2 dr \quad (20)$$

و یا:

$$E_{Ci} = \frac{\pi \rho h d^2 V_i^2}{8} + \frac{\pi \rho h V_i^2}{(2r_{ti} - d)^2}$$

$$\left(\frac{1}{3} r_{ti}^4 - \frac{1}{2} r_{ti}^2 d^2 + \frac{1}{3} r_{ti} d^3 - \frac{1}{16} d^4 \right) \quad (21)$$

با محاسبه انرژی تلف شده از پرتابه در هر فاصله زمانی می‌توان سرعت پرتابه در انتهای آن فاصله زمانی (ابتدای فاصله زمانی بعدی) را بدست آورد:

$$V_{i+1} = \sqrt{V_0^2 - \frac{2}{m} E_{Li}} \quad (22)$$

۵- نتایج و بحث

با استفاده از مدل تحلیلی و بکارگیری نرم‌افزار متلب محاسبات برای نمونه‌های نانوماده مرکب انجام شد. خواص

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

در طی فرایند نفوذ، قبل از شکست یک لایه، خرابی لایه لایه‌ای 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٪ کرنش شکست نهایی در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. خرابی لایه لایه‌ای 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 می‌باشد به‌طوریکه موریه و همکارانش [۱۲] از آنها صرف‌نظر می‌کند. رشد لایه لایه‌ای شدن در مد دوم شکست رخ می‌افتد. مطالعات [۱۸، ۱۷] بر روی شروع و گسترش لایه لایه‌ای شدن در اهداف ساخته شده از مواد مرکب بافته شده نشان می‌دهند که گسترش خرابی لایه لایه‌ای شدن در امتداد تار و پود ماده مرکب بیشتر از جهات دیگر می‌باشد. در نتیجه ناحیه خرابی بیش از اینکه به شکل دایره باشد بصورت گلبرگی است. در صورتی که مساحت ناحیه لایه لایه‌ای شدن C_I برابر مساحت دایره متناظر با آن در نظر گرفته شود، انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های خرابی لایه لایه‌ای شدن و ترک خوردگی ماتریس در فاصله زمانی t برابرند با:

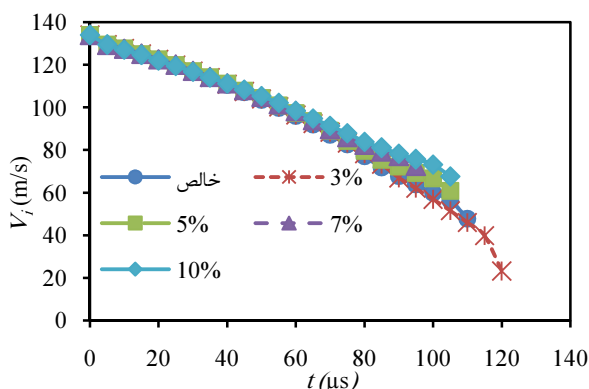
$$E_{Di} = (c_1 \pi r_{ai}^2) G_{II} \quad (15)$$

$$E_{Mi} = (c_1 \pi r_{ai}^2) h_1 V_m E_m \quad (16)$$

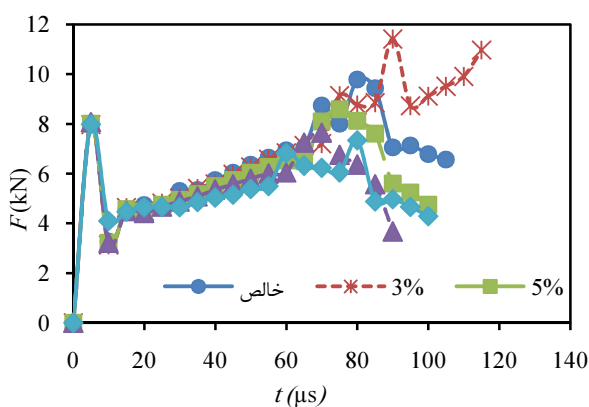
پس از شکست لایه، فرض می‌شود انرژی جذب شده توسط این دو مکانیزم ثابت باقی خواهد ماند.

۴-۴- انرژی جذب شده توسط انتقال انرژی جنبشی به مخروط ایجاد شده در پشت هدف

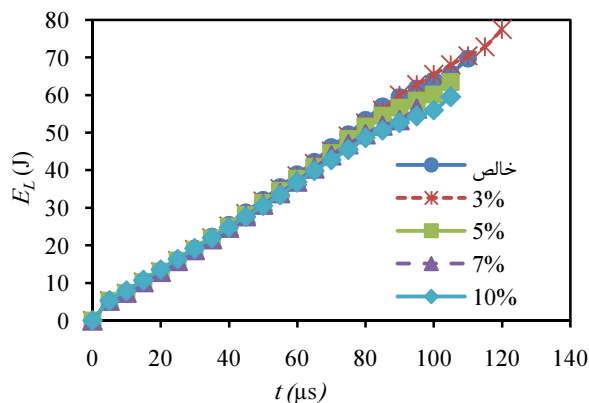
در طی فرایند نفوذ، تغییر شکل مخروطی در پشت صفحه



الف- تغییرات سرعت پرتابه



ب- تغییرات انرژی جذب شده پرتابه



ج- تغییرات نیروی وارد شده به پرتابه

شکل ۴ تغییر پارامترهای مختلف در طی فرایند نفوذ در درصدهای وزنی مختلف نانورس ($V_f=134m/s$)

همانطور که انتظار می‌رود در سرعت برخورد $134m/s$ ، بیشترین نیروی وارد بر پرتابه در نمونه‌های ۳ درصد و در سرعت برخورد $169m/s$ در ۳ و ۱۰ درصد وزنی نانورس اعمال می‌شود.

مکانیکی مشترک و خاص نمونه‌های مختلف به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است [۱۵].

جدول ۱ مشخصات مشترک پرتابه و هدف [۱۵]

| مشخصات پرتابه: | |
|----------------------------|------------------------------|
| سرخت | شکل |
| $M_p=8/9gr$ | جرم |
| $d=10mm$ | قطر |
| مشخصات هدف: | |
| $2D Woen Glass/ Epoxy$ | جنس |
| ۵۰٪ | درصد وزنی الیاف |
| $h=2/6mm$ | ضخامت |
| $N_f=12$ | تعداد لایه ها |
| $N_f=11$ | لایه تعداد الیاف اولیه در یک |
| $E_m=0/9 MJ/m^3$ | انرژی ترک خوردگی رزین |
| $G_{II}=1200 MJ/m^3$ | نرخ رهایی انرژی کرنشی مد دوم |
| $b=9/25$ | ضریب انتقال موج تنش |
| $\epsilon_d=0/4\epsilon_R$ | کرنش استانه خرابی |
| $c_I=0/9$ | ضریب کاهش سطح |

جدول ۲ خواص فیزیکی و مکانیکی اهداف نانومواد مرکب [۱۵]

| ϵ (%) | E (Gpa) | V_i (m/s) | ρ (kg/m^3) | نانورس (%) |
|----------------|-----------|-------------|---------------------|------------|
| ۲/۲۵ | ۱۸/۰۴ | ۱۳۴ | ۱۹۰۷ | ۰ |
| ۲/۳۶ | ۱۹/۸۴ | ۱۶۹ | ۱۹۰۷ | ۰ |
| ۲/۳ | ۱۸/۴ | ۱۳۴ | ۱۹۲۵ | ۳ |
| ۲/۴۲ | ۲۰/۲۴ | ۱۶۹ | ۱۹۲۵ | ۳ |
| ۲/۳۸ | ۱۷/۵۵ | ۱۳۴ | ۱۹۳۷ | ۵ |
| ۲/۴۰ | ۱۹/۳ | ۱۶۹ | ۱۹۳۷ | ۵ |
| ۲/۲۱ | ۱۸/۰۴ | ۱۳۴ | ۱۹۵۰ | ۷ |
| ۲/۳۲ | ۱۹/۸۴ | ۱۶۹ | ۱۹۵۰ | ۷ |
| ۲/۲۱ | ۱۲/۲۵ | ۱۳۴ | ۱۹۶۹ | ۱۰ |
| ۲/۴۳ | ۱۵/۳۱ | ۱۶۹ | ۱۹۶۹ | ۱۰ |

شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات سرعت پرتابه، انرژی جذب شده و نیروی اعمال شده به پرتابه را در طی فرایند نفوذ به ترتیب برای سرعت‌های برخورد $134m/s$ و $169m/s$ نشان می‌دهد. همچنان که در این شکل‌ها می‌توان دید انرژی جذب شده و نیروی وارد بر پرتابه که عامل اصلی در کاهش انرژی پرتابه است تا حدود نیمه اول فرایند نفوذ در تمامی نمونه‌ها یکسان بوده و به تدریج با برش الیاف و شکست لایه‌ها، اختلاف در نمونه‌ها نمایان خواهد شد.

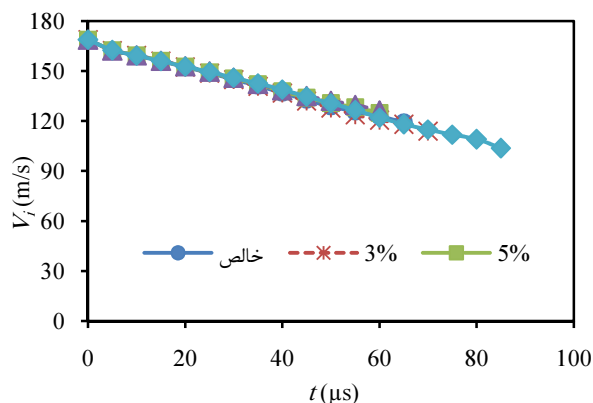
بدست آمده از تئوری و آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که می‌توان دید هم‌خوانی بسیار خوبی بین نتایج تئوری ارائه شده و نتایج تجربی در تمامی نمونه‌ها و سرعت‌های برخورد دیده می‌شود.

جدول ۳ نتایج تئوری و تجربی در درصد‌های وزنی مختلف نانورس

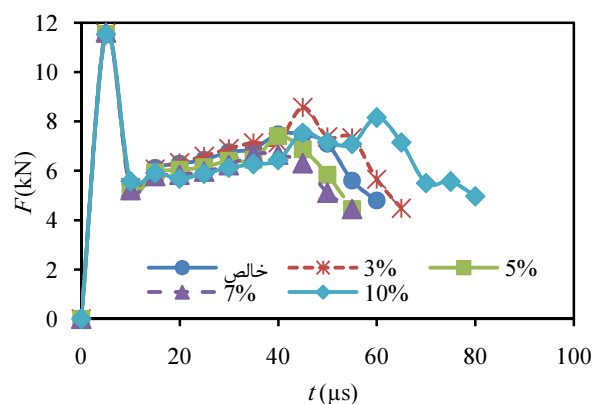
| نانورس (%) | سرعت (m/s) | سرعت باقیمانده (m/s) | | سرعت (m/s) | تئوری | تجربی | سطح خرابی (cm ²) | |
|------------|------------|----------------------|-------|------------|-------|-------|------------------------------|-------|
| | | تجربی | تئوری | | | | تجربی | تئوری |
| ۰ | ۱۳۴ | ۴۷/۸ | ۴۶/۸ | ۱۲/۰ | ۱۲/۳ | ۶/۲ | ۱۲/۳ | ۵/۶ |
| | ۱۶۹ | ۱۱۹/۳ | ۱۱۹/۵ | ۶/۹ | ۷/۶ | ۱۱/۸ | ۱۱/۸ | ۵/۷ |
| | ۱۳۴ | ۲۳/۲ | ۲۵/۳ | ۱۳/۷ | ۱۳/۶ | ۱۱/۰ | ۱۱/۰ | ۱۰/۴ |
| ۳ | ۱۶۹ | ۱۱۴/۰ | ۱۱۳/۸ | ۶/۹ | ۷/۶ | ۱۱/۸ | ۱۱/۸ | ۵/۷ |
| | ۱۳۴ | ۶۰/۸ | ۶۰/۸ | ۱۱/۸ | ۱۱/۸ | ۱۱/۸ | ۱۱/۸ | ۵/۷ |
| | ۱۶۹ | ۱۲۴/۹ | ۱۲۸/۷ | ۱۳/۷ | ۱۳/۶ | ۱۱/۰ | ۱۱/۰ | ۱۰/۴ |
| ۵ | ۱۶۹ | ۶۷/۷ | ۶۵/۴ | ۷/۳ | ۷/۱ | ۷/۱ | ۷/۱ | ۷/۳ |
| | ۱۳۴ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۶/۷ | ۵/۷ | ۷/۱ | ۷/۱ | ۷/۱ | ۷/۳ |
| | ۱۶۹ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۳/۷ | ۵/۷ | ۷/۱ | ۷/۱ | ۷/۱ | ۷/۳ |

جدول ۴ و جدول ۵ تعداد الیاف و لایه‌های شکسته شده، شعاع موج عرضی و سرعت پرتابه را بر حسب زمان نفوذ به ترتیب برای سرعت‌های برخورد ۱۳۴m/s و ۱۶۹m/s نشان می‌دهد. همان طور که می‌توان دید در هر دو سرعت برخورد، شعاع گسترش یافته موج عرضی در نمونه‌های مختلف به جز نمونه‌های محتوی ۱۰ درصد وزنی نانورس تقریباً یکسان است، بنابراین نمی‌توانند تأثیر زیادی در مقاومت در برابر نفوذ پرتابه داشته باشند (به جز نمونه‌های ۱۰ درصد وزنی نانورس).

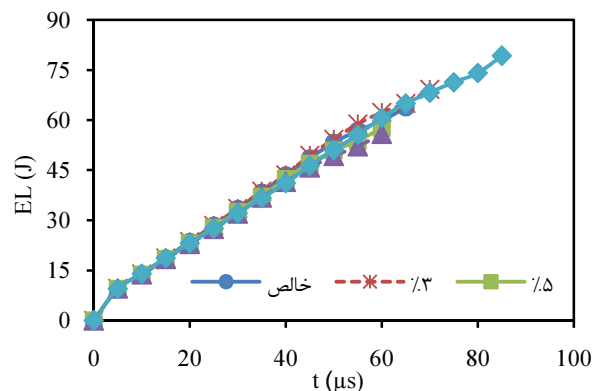
به نظر می‌رسد آن چه بیش از هر چیزی باعث افزایش مقاومت در برابر نفوذ پرتابه در ۳ درصد می‌شود، افزایش زمان نفوذ به دلیل به تعویق انداختن شکست الیاف و لایه‌ها، با افزایش خواص مکانیکی باشد. همچنین علت اصلی بهبود خواص بالستیکی در ۱۰ درصد وزنی نانورس کند بودن فرایند شکست (حذف) لایه‌ها در این نمونه‌ها به دلیل کمتر شدن تنش حداکثر الیاف است به طوری که با وجود این که در سرعت برخورد ۱۳۴m/s شکست لایه‌ها در نمونه‌های ۱۰ درصد قبل از ۷ درصد شروع می‌شود ولیکن زمان کل نفوذ در ۱۰ درصد بیش از ۷ درصد وزنی نانورس است.



الف- تغییرات سرعت پرتابه



ب- تغییرات انرژی جذب شده پرتابه



ج- تغییرات نیروی وارد شده به پرتابه

شکل ۵ تغییر پارامترهای مختلف در طی فرایند نفوذ در درصد‌های وزنی مختلف نانورس (V_i=۱۶۹m/s)

زمانی که یک لایه شکسته می‌شود نیروی فشاری بر لایه‌های زیری همراه با جهش افزایش خواهد یافت که بصورت قله‌هایی در نمودارهای نیرو قابل مشاهده است.

جدول ۳ نتایج مقادیر سرعت باقی‌مانده و مساحت خرابی

جدول ۴ نتایج محاسبات تئوری در فواصل زمانی مختلف و در درصد وزنی نانورس ($V_f=134m/s$)

| تعداد الیاف شکسته شده | | | | | تعداد لایه های شکسته شده | | | | | شعاع موج عرضی (mm) | | | | | سرعت پرتابه (m/s) | | | | | t |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|--------------------------|----|----|----|------|--------------------|------|------|------|------|-------------------|-------|-------|-------|------|------|
| درصد وزنی نانورس | | | | | درصد وزنی نانورس | | | | | درصد وزنی نانورس | | | | | درصد وزنی نانورس | | | | | (μs) |
| ۱۰ | ۷ | ۵ | ۳ | خالص | ۱۰ | ۷ | ۵ | ۳ | خالص | ۱۰ | ۷ | ۵ | ۳ | خالص | ۱۰ | ۷ | ۵ | ۳ | خالص | |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۳۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۱۳۴/۰ | ۱۳۴/۰ | ۱۳۴/۰ | ۱۳۴/۰ | ۸/۰ | ۰ |
| ۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۲۸ | ۵/۹ | ۶/۱ | ۶/۱ | ۶/۱ | ۵/۳ | ۱۲۹/۵ | ۱۲۹/۵ | ۱۲۹/۵ | ۱۲۹/۵ | ۳/۳ | ۵ |
| ۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۲۵ | ۷/۵ | ۸/۰ | ۸/۰ | ۸/۰ | ۶/۲ | ۱۲۷/۲ | ۱۲۷/۷ | ۱۲۷/۷ | ۱۲۷/۸ | ۴/۶ | ۱۰ |
| ۸ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۲۲ | ۹/۱ | ۹/۸ | ۹/۸ | ۹/۸ | ۷/۴ | ۱۲۴/۷ | ۱۲۵/۱ | ۱۲۵/۱ | ۱۲۵/۲ | ۴/۷ | ۱۵ |
| ۱۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۲۰ | ۱۰/۷ | ۱۱/۶ | ۱۱/۶ | ۱۱/۷ | ۸/۵ | ۱۲۲/۱ | ۱۲۲/۶ | ۱۲۲/۶ | ۱۲۲/۶ | ۴/۷ | ۲۰ |
| ۱۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۱۷ | ۱۲/۴ | ۱۳/۵ | ۱۳/۴ | ۱۳/۶ | ۹/۸ | ۱۱۹/۵ | ۱۲۰/۰ | ۱۱۹/۹ | ۱۱۹/۹ | ۵/۳ | ۲۵ |
| ۱۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۱۴ | ۱۴/۰ | ۱۵/۴ | ۱۵/۳ | ۱۵/۵ | ۱۱/۱ | ۱۱۶/۸ | ۱۱۷/۳ | ۱۱۷/۲ | ۱۱۷/۱ | ۵/۳ | ۳۰ |
| ۱۶ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۱۱ | ۱۵/۶ | ۱۷/۳ | ۱۷/۲ | ۱۷/۴ | ۱۲/۵ | ۱۱۴/۱ | ۱۱۴/۴ | ۱۱۴/۲ | ۱۱۴/۱ | ۵/۷ | ۳۵ |
| ۲۲ | ۵ | ۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۷ | ۱۷/۲ | ۱۹/۲ | ۱۹/۲ | ۱۹/۴ | ۱۳/۹ | ۱۱۱/۳ | ۱۱۱/۴ | ۱۱۱/۱ | ۱۱۰/۹ | ۶/۰ | ۴۰ |
| ۲۲ | ۱۰ | ۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۴ | ۱۸/۸ | ۲۱/۲ | ۲۱/۱ | ۲۱/۴ | ۱۵/۳ | ۱۰۸/۴ | ۱۰۸/۳ | ۱۰۷/۹ | ۱۰۷/۶ | ۶/۴ | ۴۵ |
| ۲۸ | ۱۶ | ۱۲ | ۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۲۰/۴ | ۲۳/۱ | ۲۳/۱ | ۲۳/۴ | ۱۶/۷ | ۱۰۵/۴ | ۱۰۵/۰ | ۱۰۴/۵ | ۱۰۴/۰ | ۶/۷ | ۵۰ |
| ۳۰ | ۲۱ | ۱۶ | ۱۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۹۶ | ۲۲/۰ | ۲۵/۱ | ۲۵/۰ | ۲۵/۴ | ۱۸/۲ | ۱۰۲/۳ | ۱۰۱/۶ | ۱۰۱/۰ | ۱۰۰/۳ | ۶/۹ | ۵۵ |
| ۴۱ | ۳۰ | ۲۳ | ۱۴ | ۱ | ۲ | ۱ | ۰ | ۰ | ۹۲ | ۲۳/۶ | ۲۷/۰ | ۲۷/۰ | ۲۷/۴ | ۱۹/۵ | ۹۸/۴ | ۹۸/۲ | ۹۷/۳ | ۹۶/۵ | ۷/۰ | ۶۰ |
| ۵۰ | ۴۷ | ۲۷ | ۱۹ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۰ | ۸۷ | ۲۵/۲ | ۲۹/۰ | ۲۸/۹ | ۲۹/۴ | ۱۹/۵ | ۹۴/۹ | ۹۴/۲ | ۹۳/۷ | ۹۲/۵ | ۸/۷ | ۶۵ |
| ۶۰ | ۶۴ | ۴۳ | ۲۵ | ۴ | ۴ | ۵ | ۳ | ۱ | ۸۳ | ۲۶/۸ | ۳۰/۹ | ۳۰/۹ | ۳۱/۴ | ۱۹/۵ | ۹۱/۴ | ۸۹/۹ | ۸۹/۱ | ۸۸/۴ | ۸/۰ | ۷۰ |
| ۷۳ | ۸۴ | ۶۲ | ۳۸ | ۶ | ۶ | ۷ | ۵ | ۲ | ۷۷ | ۲۸/۴ | ۳۲/۹ | ۳۲/۹ | ۳۳/۵ | ۱۹/۵ | ۸۸/۰ | ۸۶/۱ | ۸۴/۳ | ۸۳/۳ | ۹/۸ | ۷۵ |
| ۸۶ | ۹۹ | ۸۲ | ۴۹ | ۷ | ۷ | ۹ | ۷ | ۳ | ۷۲ | ۳۰/۰ | ۳۴/۸ | ۳۴/۸ | ۳۵/۵ | ۱۹/۵ | ۸۳/۸ | ۸۲/۵ | ۷۹/۷ | ۷۸/۴ | ۹/۴ | ۸۰ |
| ۹۷ | ۱۱۰ | ۹۷ | ۶۲ | ۸ | ۸ | ۱۰ | ۸ | ۵ | ۶۸ | ۳۱/۶ | ۳۶/۸ | ۳۶/۸ | ۳۷/۵ | ۱۹/۵ | ۸۱/۱ | ۷۹/۳ | ۷۵/۴ | ۷۳/۴ | ۷/۱ | ۸۵ |
| ۱۰۴ | ۱۲۱ | ۱۰۶ | ۷۵ | ۹ | ۹ | ۱۱ | ۹ | ۶ | ۶۴ | ۳۳/۲ | ۳۸/۷ | ۳۸/۷ | ۳۹/۵ | ۱۹/۵ | ۷۸/۳ | ۷۷/۳ | ۷۲/۳ | ۶۷/۰ | ۷/۱ | ۹۰ |
| ۱۱۰ | ۱۳۲ | ۱۱۰ | ۸۶ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۲ | ۱۰ | ۷ | ۶۰ | ۳۴/۸ | ۴۰/۷ | ۴۰/۷ | ۴۱/۵ | ۱۹/۵ | ۷۵/۷ | ۷۲/۶ | ۶۹/۳ | ۶۲/۱ | ۶/۸ | ۹۵ |
| ۱۲۱ | | ۱۲۱ | ۹۵ | ۱۱ | ۱۱ | | ۱۱ | ۸ | ۵۶ | ۳۶/۵ | | ۴۲/۶ | ۴۳/۵ | ۱۹/۵ | ۷۳/۳ | | ۶۶/۷ | ۵۶/۹ | ۶/۶ | ۱۰۰ |
| ۱۳۲ | | ۱۳۲ | ۹۹ | ۱۲ | ۱۲ | | ۱۲ | ۹ | ۴۸ | ۳۸/۱ | | ۴۴/۶ | ۴۵/۵ | ۱۹/۵ | ۶۷/۷ | | ۶۰/۸ | ۵۱/۶ | ۰/۰ | ۱۰۵ |
| | | | ۱۱۰ | | | | | ۱۰ | | | | | ۴۷/۶ | ۰/۰ | | | | ۴۶/۰ | ۰/۰ | ۱۱۰ |
| | | | | ۱۲۱ | | | | ۱۱ | | | | | ۴۹/۶ | | | | | ۳۹/۸ | | ۱۱۵ |
| | | | | | ۱۳۲ | | | ۱۲ | | | | | ۵۱/۶ | | | | | ۲۳/۲ | | ۱۲۰ |

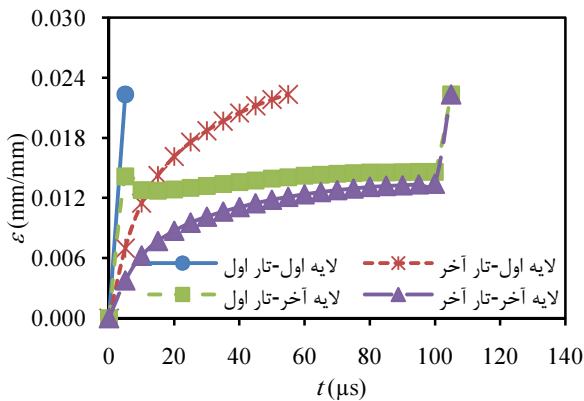
جذب انرژی بیشتر در این نمونه‌ها می‌باشد. در نمونه‌های ۱۰ درصد، شیب افزایش کرنش بسیار کندتر از نمونه‌های خالص است (شکل ۸)، با این وجود در سرعت برخورد $134m/s$ به دلیل کمتر بودن خواص مکانیکی، شکست در نمونه‌های ۱۰ درصد زودتر اتفاق افتاده و در نتیجه انرژی جذب شده کمتر خواهد بود (شکل ۸-الف). ولیکن در سرعت برخورد $169m/s$ به دلیل افزایش شیب کرنش در نمونه‌ها و شکست سریع تارها، کند بودن شیب کرنش در نمونه‌ها غالب بوده و باعث به تعویق افتادن شکست و در نتیجه جذب انرژی بیشتر خواهد شد (شکل ۸-ب).

این موضوع تأثیر خود را به‌ویژه در سرعت برخورد $169m/s$ بیشتر نشان می‌دهد و باعث افزایش زمان فرایند نفوذ و بازده مقاومت بالستیکی می‌شود. شکل‌های ۶ و ۷ مقادیر کرنش را در تارهای اول و آخر لایه‌های اول و آخر در نمونه‌های ۰، ۳ و ۱۰ درصد نانورس به ترتیب برای سرعت‌های برخورد $134m/s$ و $169m/s$ نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب و همچنین شکل‌های ۷-الف و ۷-ب می‌توان دید نمودارهای کرنش نمونه‌های خالص و محتوی ۳ درصد وزنی نانورس در زمان‌های یکسان نزدیک به هم می‌باشد و بیشتر بودن زمان شکست الیاف در نمونه‌های ۳ درصد (به دلیل مقاومت بالاتر)، نسبت به نمونه‌های خالص عامل

جدول ۵ نتایج محاسبات تئوری در فواصل زمانی مختلف و در درصد وزنی نانورس ($V_f=169m/s$)

| t (μs) | سرعت پرتابه (m/s) | | | | | شعاع موج عرضی (mm) | | | | | تعداد لایه های شکسته شده | | | | | تعداد الیاف شکسته شده | | | | | | | |
|------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|------|------|------|------|--------------------------|------|------|------|------|-----------------------|------------------|------|----|-----|-----|-----|---|
| | خالص | ۳ | ۵ | ۷ | ۱۰ | خالص | ۳ | ۵ | ۷ | ۱۰ | درصد وزنی نانورس | خالص | ۳ | ۵ | ۷ | ۱۰ | درصد وزنی نانورس | خالص | ۳ | ۵ | ۷ | ۱۰ | |
| ۰ | ۱۱/۵ | ۱۶۹/۰ | ۱۶۹/۰ | ۱۶۹/۰ | ۱۶۹/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۵ | ۵/۴ | ۱۶۲/۵ | ۱۶۲/۵ | ۱۶۲/۵ | ۱۶۲/۵ | ۶/۱ | ۶/۲ | ۶/۲ | ۶/۲ | ۶/۲ | ۱۵۹ | ۶/۱ | ۶/۲ | ۶/۲ | ۶/۲ | ۶/۱ | ۱۵۹ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۰ | ۶/۱ | ۱۵۹/۵ | ۱۵۹/۶ | ۱۵۹/۵ | ۱۵۹/۵ | ۷/۴ | ۸/۴ | ۸/۳ | ۸/۳ | ۷/۹ | ۱۵۶ | ۷/۴ | ۸/۳ | ۸/۳ | ۸/۳ | ۷/۹ | ۱۵۶ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۱۵ | ۶/۳ | ۱۵۶/۱ | ۱۵۶/۲ | ۱۵۶/۲ | ۱۵۶/۱ | ۸/۸ | ۱۰/۵ | ۱۰/۳ | ۱۰/۳ | ۹/۸ | ۱۵۲ | ۹/۸ | ۱۰/۴ | ۱۰/۳ | ۱۰/۵ | ۹/۸ | ۱۵۲ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲۰ | ۶/۵ | ۱۵۲/۵ | ۱۵۲/۸ | ۱۵۲/۸ | ۱۵۲/۵ | ۱۰/۴ | ۱۲/۷ | ۱۲/۴ | ۱۲/۴ | ۱۱/۶ | ۱۴۹ | ۱۱/۶ | ۱۲/۴ | ۱۲/۴ | ۱۲/۷ | ۱۱/۶ | ۱۴۹ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲۵ | ۶/۸ | ۱۴۸/۸ | ۱۴۹/۴ | ۱۴۹/۴ | ۱۴۸/۸ | ۱۱/۹ | ۱۴/۸ | ۱۴/۵ | ۱۴/۵ | ۱۳/۵ | ۱۴۵ | ۱۳/۵ | ۱۴/۵ | ۱۴/۵ | ۱۴/۸ | ۱۳/۵ | ۱۴۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳۰ | ۶/۹ | ۱۴۴/۹ | ۱۴۵/۸ | ۱۴۵/۸ | ۱۴۴/۹ | ۱۳/۳ | ۱۷/۰ | ۱۶/۶ | ۱۶/۶ | ۱۵/۴ | ۱۴۱ | ۱۵/۴ | ۱۶/۶ | ۱۶/۶ | ۱۷/۰ | ۱۵/۴ | ۱۴۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳۵ | ۷/۵ | ۱۴۰/۹ | ۱۴۲/۲ | ۱۴۲/۲ | ۱۴۰/۹ | ۱۳/۳ | ۱۹/۲ | ۱۸/۷ | ۱۸/۷ | ۱۷/۳ | ۱۳۷ | ۱۷/۳ | ۱۸/۷ | ۱۸/۷ | ۱۹/۲ | ۱۷/۳ | ۱۳۷ | ۳ | ۰ | ۳ | ۲ | ۰ | ۰ |
| ۴۰ | ۷/۵ | ۱۳۶/۹ | ۱۳۸/۰ | ۱۳۸/۰ | ۱۳۶/۹ | ۱۳/۳ | ۲۱/۳ | ۲۰/۸ | ۲۰/۸ | ۱۹/۱ | ۱۳۳ | ۱۹/۱ | ۲۰/۸ | ۲۰/۸ | ۲۱/۳ | ۱۹/۱ | ۱۳۳ | ۶ | ۱ | ۶ | ۵ | ۲ | ۰ |
| ۴۵ | ۷/۱ | ۱۳۲/۱ | ۱۳۴/۱ | ۱۳۴/۱ | ۱۳۲/۱ | ۱۳/۳ | ۲۳/۵ | ۲۲/۹ | ۲۲/۹ | ۲۱/۰ | ۱۲۹ | ۲۱/۰ | ۲۲/۹ | ۲۲/۹ | ۲۳/۵ | ۲۱/۰ | ۱۲۹ | ۸ | ۲ | ۸ | ۸ | ۴ | ۰ |
| ۵۰ | ۵/۶ | ۱۲۷/۹ | ۱۳۰/۸ | ۱۳۰/۸ | ۱۲۷/۹ | ۱۳/۳ | ۲۵/۶ | ۲۴/۹ | ۲۴/۹ | ۲۲/۹ | ۱۲۶ | ۲۲/۹ | ۲۵/۰ | ۲۴/۹ | ۲۵/۶ | ۲۲/۹ | ۱۲۶ | ۱۰ | ۳ | ۱۰ | ۱۰ | ۷ | ۰ |
| ۵۵ | ۴/۸ | ۱۲۳/۸ | ۱۲۸/۳ | ۱۲۸/۳ | ۱۲۳/۸ | ۱۳/۳ | ۲۷/۸ | ۲۷/۰ | ۲۷/۰ | ۲۴/۷ | ۱۲۳ | ۲۴/۷ | ۲۷/۱ | ۲۷/۰ | ۲۷/۸ | ۲۴/۷ | ۱۲۳ | ۱۱ | ۵ | ۱۱ | ۱۱ | ۹ | ۰ |
| ۶۰ | ۰/۰ | ۱۲۰/۶ | ۱۲۴/۹ | ۱۲۴/۹ | ۱۲۰/۶ | ۱۳/۳ | ۲۹/۹ | ۲۹/۱ | ۲۹/۱ | ۲۶/۶ | ۱۱۹ | ۲۶/۶ | ۲۹/۲ | ۲۹/۱ | ۲۹/۹ | ۲۶/۶ | ۱۱۹ | ۱۲ | ۷ | ۱۲ | ۱۲ | ۱۰ | ۰ |
| ۶۵ | ۰/۰ | ۱۱۸/۱ | ۱۱۸/۱ | ۱۱۸/۱ | ۱۱۸/۱ | -/۰ | ۳۲/۱ | -/۰ | ۳۲/۱ | ۲۸/۵ | - | ۲۸/۵ | -/۰ | ۳۲/۱ | ۲۸/۵ | - | ۲۸/۵ | ۸ | ۰ | ۸ | ۱۱ | ۰ | ۰ |
| ۷۰ | ۱۱۴/۰ | ۱۱۵/۰ | ۱۱۵/۰ | ۱۱۵/۰ | ۱۱۴/۰ | ۳۴/۳ | ۳۴/۳ | ۳۴/۳ | ۳۴/۳ | ۳۰/۴ | ۱۰۶ | ۳۰/۴ | ۳۴/۳ | ۳۴/۳ | ۳۴/۳ | ۳۰/۴ | ۱۰۶ | ۹ | ۱۲ | ۱۳۲ | ۱۳۲ | ۱۰۶ | ۰ |
| ۷۵ | ۱۱۱/۹ | ۱۱۱/۹ | ۱۱۱/۹ | ۱۱۱/۹ | ۱۱۱/۹ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۱۱۰ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۳۲/۲ | ۱۱۰ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۱۰ | ۱۱۰ | ۱۱۰ | ۰ |
| ۸۰ | ۱۰۹/۱ | ۱۰۹/۱ | ۱۰۹/۱ | ۱۰۹/۱ | ۱۰۹/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۱۲۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۳۴/۱ | ۱۲۱ | ۱۱ | ۱۱ | ۱۲۱ | ۱۲۱ | ۱۲۱ | ۰ |
| ۸۵ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۳/۷ | ۱۰۳/۷ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۱۳۲ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۳۶/۰ | ۱۳۲ | ۱۲ | ۱۲ | ۱۳۲ | ۱۳۲ | ۱۳۲ | ۰ |

ب- ۳ درصد وزنی

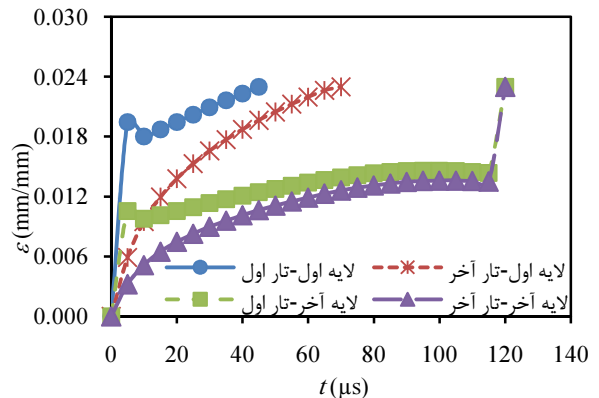
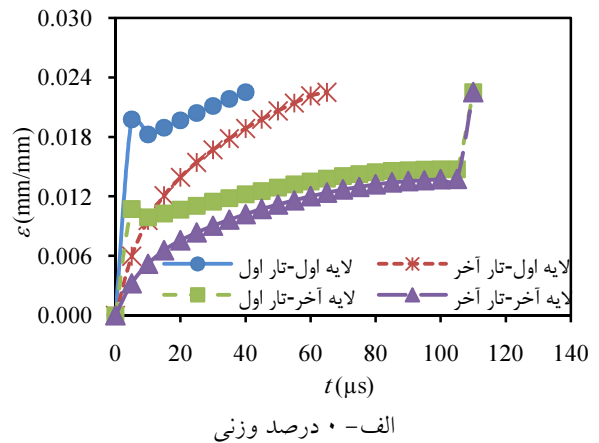


ج- ۱۰ درصد وزنی نانورس

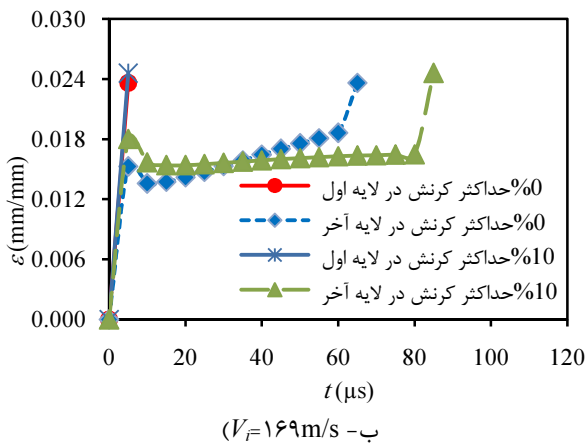
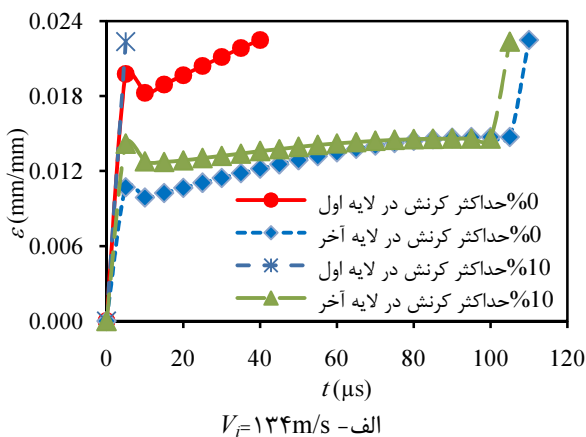
شکل ۶ تغییرات حداکثر کرنش بر حسب زمان در درصدهای وزنی مختلف نانورس ($V_f=134m/s$)

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثرات نانورس کلوسیدسی بی بر روی قابلیت جذب انرژی بالستیکی نانومواد مرکب هیبریدی شیشه/اپوکسی/نانورس به طور تئوری و تجربی بررسی شد.



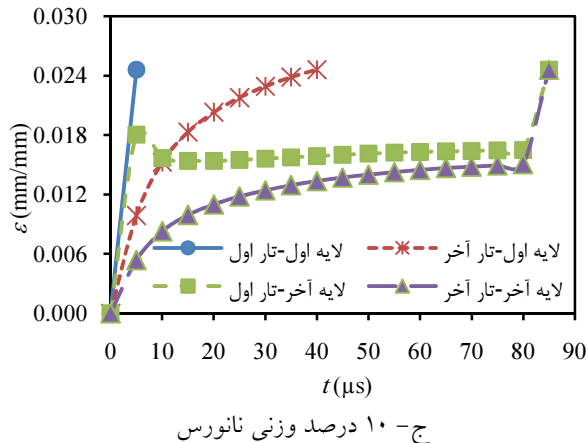
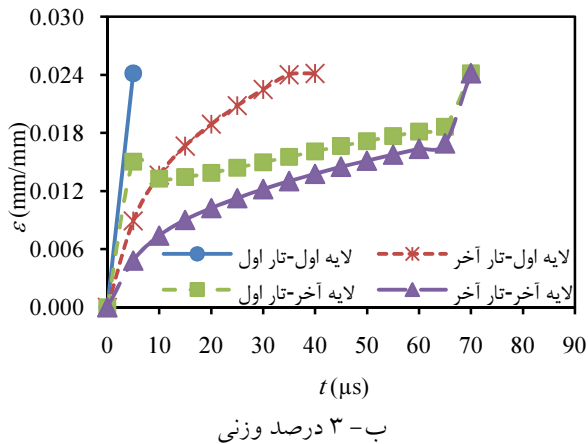
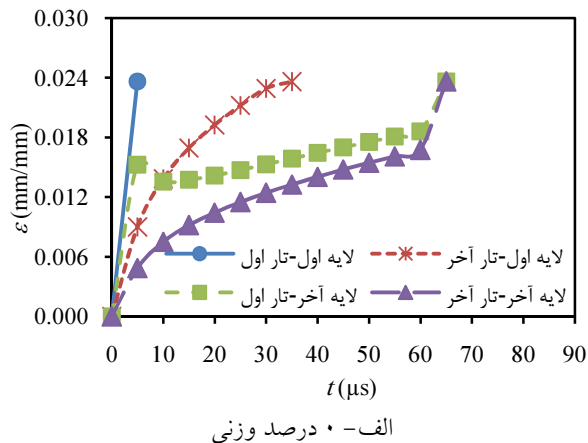
در هر دو سرعت‌های نزدیک حد بالستیک و نسبتاً بیش از آن، به مقدار ۱۰ درصد نسبت به نمونه‌های خالص می‌باشد. با این وجود بهترین افزایش جذب انرژی در سرعت‌های نسبتاً بالاتر از حد بالستیک، در ۱۰ درصد وزنی نانورس به مقدار ۲۰ درصد حاصل می‌شود.



شکل ۸ تغییرات حداکثر کرنش در نمونه‌های ۰ و ۱۰ درصد وزنی نانورس بر حسب زمان در لایه‌های اول و آخر

۷- فهرست علائم

- a عرض تار (m)
- A سطح مقطع تار (m²)
- ac_i شتاب پرتابه در فاصله زمانی i (m/s²)
- b ضریب انتقال موج تنش
- c₁ ضریب کاهش سطح
- c_e سرعت موج الستیکی (m/s)
- c_p سرعت موج پلاستیکی (m/s)



شکل ۷ تغییرات حداکثر کرنش بر حسب زمان در درصدهای وزنی مختلف نانورس (V_f = 169 m/s)

مقایسه نتایج تئوری و آزمایش نشان دهنده هم‌خوانی خوب بین این نتایج است. همچنین این نتایج نشان می‌دهند حالت بهینه افزایش خواص بالستیکی در ۳ درصد وزنی نانورس بدست می‌آید. در این درصد وزنی نانورس، مقدار جذب انرژی

| | | | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------|
| ϵ_0 | کرنش حداکثر در یک تار | c_t | سرعت موج عرضی (m/s) |
| ϵ_{0i} | کرنش حداکثر در یک لایه در فاصله زمانی i | d | قطر پرتابه (m) |
| ϵ'_{0i} | کرنش حداکثر یک لایه به دلیل ایجاد مخروط در فاصله زمانی i | E_{Ci} | انرژی منتقل شده به مخروط در فاصله زمانی i (J) |
| ϵ''_{0i} | کرنش حداکثر به دلیل فشار مستقیم در لایه بالایی در فاصله زمانی i | E_{Di} | انرژی جذب شده به دلیل لایه‌ای شدن در فاصله زمانی i (J) |
| ϵ_p | کرنش پلاستیک | E_i | مدول کششی کامپوزیت (Pa) |
| ϵ_{py} | کرنش در تار اولیه | E_L | انرژی از دست رفته پرتابه (J) |
| ϵ_{sy} | کرنش در تار ثانویه | E_{Li} | انرژی از دست رفته پرتابه در انتهای فاصله زمانی i (J) |
| σ_p | تنش پلاستیک (Pa) | E_m | انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین بر واحد حجم (J) |
| ρ | چگالی هدف (kg/m^3) | E_{Mi} | انرژی جذب شده به دلیل ترک خوردگی رزین در انتهای فاصله زمانی i (J) |
| | | E_{Pi} | انرژی جذب شده توسط تارهای اولیه در انتهای فاصله زمانی i (J) |
| | | E_{Si} | انرژی جذب شده توسط تارهای ثانویه در انتهای فاصله زمانی i (J) |
| | | F_i | نیروی مقاوم در برابر حرکت پرتابه در فاصله زمانی i (J) |
| | | G_{II} | نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی بحرانی (J/m^2) |
| | | h | ضخامت کامپوزیت (m) |
| | | h_1 | ضخامت یک لایه (m) |
| | | KE | انرژی جنبشی پرتابه (J) |
| | | m | جرم پرتابه (kg) |
| | | r_{di} | شعاع جدایش یک لایه در فاصله زمانی i (m) |
| | | r_{pi} | فاصله پیموده شده توسط موج پلاستیک تا فاصله زمانی i (m) |
| | | r_{ti} | فاصله پیموده شده توسط موج عرضی تا فاصله زمانی i (m) |
| | | V_0 | سرعت اولیه پرتابه (m/s) |
| | | V_b | حد بالاستیک (m/s) |
| | | V_{ci} | سرعت مخروط ایجاد شده در فاصله زمانی i (m/s) |
| | | V_{i+1} | سرعت پرتابه در انتهای فاصله زمانی i (m/s) |
| | | V_m | درصد حجمی رزین |
| | | V_r | سرعت باقیمانده پرتابه (m/s) |
| | | Z_i | فاصله پیموده شده توسط پرتابه تا فاصله زمانی i (m) |
| | | ϵ | کرنش |

۸- مراجع

- [1] Davies G.A.O., Zhang X.; "Impact Damage Prediction in Carbon Composite Structures", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, No. 1, 1995, pp. 149-170.
 - [2] Sun L., Gibson R.F., Gordaninejad F., Suhr J.; "Energy Absorption Capability of Nanocomposites: a Review", *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 14, 2009, pp. 2392-2409.
 - [3] Yasmin A., Abot J.L., Daniel I.M.; "Processing of Clay-Epoxy Nanocomposites by Shear Mixing", *Scripta Materialia*, Vol. 49, No. 1, 2003, pp. 81-86.
 - [4] Ho M.W., Lam C.K., Kau K.T., Ng D.H.L., Hui D.; "Mechanical Properties of Epoxy Based Composites using Nanoclays", *Composites Structures*, Vol. 75, No. 3, 2006, pp. 415-421.
 - [5] Lin J.C., Chang L.C., Nien M.H., Ho H.L.; "Mechanical Behavior of Various Nanoparticle Filled Composites at Low-Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 74, No. 1, 2006, pp. 30-36.
 - [6] Uddin M.F., Sun C.T.; "Strength of Unidirectional Glass/Epoxy Composite with Silica Nanoparticle-Enhanced Matrix", *Composites Science and Technology*; Vol. 68, No. 7-8, 2008, pp. 1637-1643.
 - [7] Avila A.F., Soares M.I., Silva Neto A.; "A Study on Nanostructured Laminated Plates Behavior under Low-Velocity Impact Loadings", *International Journal of Impact Engineering*; Vol. 34, No. 1, 2007, pp. 28-41.
- [۸] پل م. ح.، لیاقت غ.، حاجی عزازی ف.، "بررسی تجربی تأثیر نانورس بر خواص بالستیکی مواد مرکب"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۲، شماره ۱، ۱۳۹۱، صص ۱۱-۲۰.
- [9] Cantwell W.J., Morton J.; "Impact Perforation of

- Smith J.C., McCrackin F.L., Schiefer H.F.; "Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Part V: Wave Propagation In Long-Impact Loading Textile Yarns Impacted Transversely", *Textile Research Journal*, 1958, pp. 288-302.
- [16] Wu E, Chang L; "Woven Glass/Epoxy Laminates Subject to Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, 16, 1995, 607-619.
- [17] 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.
- [18] Cantwell, W.J., and Morton, J. "Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP", *Composites*, Vol. 20, No. 6. 1989, pp. 545-551.
- [19] Cheng WL, Langlie S, Itoh S. "High Velocity Impact of Thick Composites", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 29, No. 2, 2003, pp. 167-84.
- [20] Lin, H.J., Lee, Y.J. "On the Inelastic Impact of Composite Laminated Plate and Shell Structures", *Composite Structures*, Vol. 14, No. 2, 1990, pp. 89-111.
- Carbon Fibre Rein-Forced", *Composites Science and Technology*, Vol. 38. No. 2, 1990, pp. 119-141.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [۱۴] پل محمدحسین، لیاقت غلامحسین، "تحلیل تئوری فرایند نفوذ پرتابه‌های سرتخت در مواد مرکب شیشه‌اپوکسی"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۲، شماره ۲، ۱۳۹۱، صص ۱۱-۱۹.
- [۱۵] پل، محمدحسین، بررسی تحلیلی و تجربی نفوذ پرتابه‌ها در مواد مرکب و تعمیم تجربی آن برای مواد مرکب تقویت شده با نانوذرات رسی، پایان‌نامه دکترا، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۱.