



## بررسی آزمایشگاهی و مدلسازی اجزا محدود جذب انرژی در چند لایه‌های فلز-الیاف شیشه تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تحت ضربه سرعت پایین

پرویز قاسمی<sup>1</sup>، امید رحمانی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

\* زنجان، صندوق پستی 45371-38791، omid.rahmani@znu.ac.ir

### چکیده

در این پژوهش مقاومت در برابر ضربه سرعت پایین شاریبی در چندلایه فلز-الیاف شیشه (گلار) تقویت شده با نانولوله کربنی چنددیواره، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، گلارهایی از 3 لایه ورق آلومینیوم الیازی 2024-T3 و 8 لایه کامپوزیتی شامل رزین اپوکسی و الیاف شیشه با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شدند. نمونه‌های مختلف به ترتیب با 0، 0.1، 0.2، 0.3 و 0.5 درصد نانولوله کربنی چنددیواره تقویت شدند. برای آماده‌سازی سطح آلومینیوم جهت بهبود چسبندگی از روش آندایز در سولفوریک اسید استفاده شد. بر اساس استاندارد ISO-179 نمونه‌های آزمون بدون ناچ تهیه و تحت آزمون ضربه شاریبی قرار گرفتند. همچنین شبیه‌سازی عددی رفتار گلار تحت ضربه شاریبی به روش المان محدود انجام شده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی چنددیواره به گلارها، جذب انرژی ضربه شاریبی افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که افزودن 0.1 درصد نانولوله کربنی تنها 0.8 درصد انرژی جذب شده را افزایش می‌دهد و بیشترین تقویت به‌ازای 0.3 درصد نانولوله کربنی و به میزان 14.36 درصد اتفاق می‌افتد. به ازای مقادیر مختلف نانولوله کربنی، مدهای شکست متفاوت در سازه مشاهده شد. آزمایش‌های انجام شده نشان دادند که تغییر شکل پلاستیک، تورق و کمانش محلی لایه آلومینیومی و شکست و بیرون کشیدگی الیاف از جمله مکانیزم‌های جذب انرژی در این نمونه‌ها هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نیز انطباق خوبی با نتایج تجربی دارند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 19 دی 1396  
پذیرش: 04 اردیبهشت 1397  
ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397  
کلید واژگان:  
ضربه شاریبی  
چندلایه فلز-الیاف  
گلار  
نانولوله کربنی  
آلومینیوم 2024-T3

## An experimental investigation and finite element modeling of energy absorption in GLARE fiber metal laminates reinforced by CNTs under low velocity impact

Parviz Ghasemi<sup>1</sup>, Omid Rahmani<sup>2\*</sup>

1- Applied Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan

2- Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan

\* P.O.B. 45371-38791, Zanjan, Iran, omid.rahmani@znu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 02 February 2018  
Accepted 24 April 2018  
Available Online 11 May 2018

#### Keywords:

Charpy Impact  
Fiber Metal Laminate  
GLARE  
Carbon Nanotube  
AL 2024-T3

### ABSTRACT

In this research, the low-velocity Charpy impact behavior of MWCNT/glass aluminum reinforced laminates (GLAREs) is investigated. For this purpose, GLAREs are made of three 2024-T3 aluminum layers and 8 glass/epoxy composite laminates by hand layup method. Specimens were reinforced by different concentrations of 0.1, 0.2, 0.3 and 0.5 wt% of MWCNT. In order to improve adhesion properties, the anodizing method in a sulfuric acid bath is used for the preparation of the aluminum surface. The Charpy impact test is implemented on unnotched specimens according to the ISO-179 test method. Also, numerical modelling of Charpy impact behavior of GLAREs is performed by finite element method. The results showed that by adding MWCNTs to GLAREs, energy absorption increases in Charpy impact test. Investigation showed by adding 0.1 wt% of CNTs, absorbed energy increases only 0.8% and maximum energy absorption occurs at 14.36% in 0.3 wt% of CNTs. The different modes of fracture observed for different concentration of CNTs. Performed experiments showed plastic deformation, delamination and local buckling of aluminum layers and breakage and pull-out of fibers are main energy absorption mechanisms in this specimens and numerical modeling has good agreement with experimental results.

آلومینیوم با کامپوزیت‌ها سازه‌هایی به دست می‌آیند که ضمن داشتن وزن سبک‌تر، نسبت به آلیاژ یک‌پارچه آلومینیوم، مقاومت در برابر آتش و خواص خستگی بهتری دارند [1، 2]. امروزه دو دسته از چندلایه‌های فلز-الیاف، که

### 1- مقدمه

چندلایه‌های فلز-الیاف، برای اولین بار در دهه 1970، به‌عنوان جایگزینی برای آلیاژهای آلومینیوم یک‌پارچه مورد توجه قرار گرفتند. با ترکیب آلیاژهای

داد که این سازه‌ها علاوه بر خواص مفید فلزات مانند نرمی، ضربه‌پذیری و کندی رشد ترک، خواص خوب کامپوزیت‌ها از قبیل مقاومت ویژه بالا، استحکام ویژه بالا، مقاومت خوردگی و خستگی را نیز دارا می‌باشند.

مطالعات زیادی در خصوص تاثیر ساختار فاز زمینه بر مستحکم کردن سازه برای افزایش انرژی جذب‌شده صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به استفاده از نانوذرات و نانولوله‌های کربنی به جهت پتانسیل آنها برای بهبود انرژی جذب‌شده و خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها اشاره نمود [14,13].

تاثیر اضافه‌شدن نانولوله کربنی چنددیواره بر روی رفتار ضربه و خواص پس از ضربه کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن توسط کوستوپولوس و همکارانش [15] بررسی شده است. آنها حدود 0.5 درصد وزنی نانولوله را به کامپوزیت اضافه کردند. خواص ضربه کامپوزیت با افزودن نانولوله‌های کربنی خصوصاً به‌ازای انرژی بالاتر بهبود یافت. خواص پس از ضربه نیز به‌ویژه برای خواص فشاری (هم مدول فشاری و هم استحکام فشاری) بهبود یافته است. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند که عمر خستگی فشاری-فشاری پس از ضربه نیز با اضافه کردن نانولوله کربنی افزایش می‌یابد.

تانگ و همکاران [16] مدهای واماندگی مختلفی از قبیل جدا شدن و بیرون‌زدن نانولوله‌ها، شکست لحظه‌ای و شکست لغزشی را در اپوکسی تقویت‌شده شناسایی نمودند که هر کدام از این‌ها می‌توانند به‌عنوان مکانیزم‌های جذب انرژی در نظر گرفته شوند.

زانگ و همکاران [17] میزان جذب انرژی در گلاز را به ازای افزودن نانولوله کربنی تا میزان 2 درصد جرمی مورد بررسی قرار دادند. آنها در بررسی خود از نانولوله‌های چند دیواره استفاده کردند و نمونه‌های خود را تحت خمش سه نقطه و سقوط وزنه قرار دادند. بررسی آنها نشان داد که افزودن نانولوله انرژی جذب شده در ضربه را بهتر می‌کند و این نتایج کاملاً وابسته به میزان پخش‌شوندگی و ترشوندگی نانولوله‌ها می‌باشد.

مسعودی و همکاران [18] تاثیر نانو ذرات رسی را بر خواص بالستیکی چندلایه‌های فلز - الیاف شیشه بررسی کردند. آنها دریافتند که تنها با افزودن 7 و 10 درصد نانو رس میزان جذب انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. شکریه و همکاران [19] تاثیر نانولوله‌های کربنی چنددیواره با طول بلند را بر خواص مکانیکی رزین و کامپوزیت‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که وجود نانولوله‌ها با طول بلند سبب افزایش برهم‌کنش بین الیاف مجاور می‌شود و از این رو مکانیزم‌های تخریبی را به تاخیر می‌اندازد و در نتیجه خواص مکانیکی را به‌ویژه در کامپوزیت بهبود می‌بخشد.

رضضانی پارسا و اسلامی فارسانی [20] میزان انرژی جذب‌شده در ضربه سرعت پایین را به‌واسطه قرارگیری آلیاژ حافظه‌دار در چندلایه‌های فلز - الیاف به‌ازای پیش‌کرنش‌های مختلف بررسی نمودند. افزایش مقاومت در برابر ضربه که با کاهش شوک نیروی ضربه، افزایش مدت زمان تماس و کاهش میزان جابجایی همراه است، از نتایج این بررسی بود.

خوانساری و همکاران [21] پاسخ چندلایه‌های فلز - الیاف کولار را در برابر ضربه بالستیک بررسی کردند. آنها در بررسی خود نشان دادند که از میان چندلایه‌های تقویت‌شده با 0، 0.5، 1 و 1.5 درصد نانولوله کربنی، چندلایه‌ای که حاوی 1 درصد نانولوله است بیشترین جذب انرژی را دارد.

کبودوند و همکاران [22] تاثیر افزودن نانولوله‌های کربنی را به گلاز مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در بررسی خود، مقادیر 0.1، 0.2، 0.3 و 0.5 درصد نانولوله را به فاز زمینه کامپوزیت در گلاز اضافه کردند و نشان دادند که با اضافه کردن این مقدار نانولوله کربنی، استحکام کششی گلاز بهتر

بر پایه آلومینیوم هستند، تجاری شده‌اند. یکی آرال<sup>1</sup> که شامل الیاف آرامید است و دیگری گلاز<sup>2</sup> که با استفاده از الیاف شیشه ساخته می‌شود. گلازها در سازه‌هایی مانند رویه بالایی سازه بدنه هواپیمای A380 به‌کار گرفته شده‌اند [3,1]. استفاده از الیاف متعامد باعث شده است که مقاومت در برابر ضربه در چندلایه‌های فلز - الیاف نسبت به آلومینیوم یک‌پارچه افزایش یابد.

آسیب در برابر ضربه، یکی از مهم‌ترین انواع آسیب‌ها در سازه‌های هواپیما است که می‌تواند به دلایل مختلفی به‌وجود آید. از آن جمله می‌توان به ضربه‌های سرعت پایین مانند سقوط ابزار حین تعمیر و نگهداری و ضربه سرعت بالا مانند برخورد پرندگان اشاره نمود [5,4]. انرژی وارد بر چندلایه‌های فلز - الیاف با استفاده از تغییر شکل پلاستیک و گسیختگی لایه فلزی، جدایش لایه‌های کامپوزیت و فلز، جدایش بین لایه‌های کامپوزیت (مانند شکست و جدایش الیاف) جذب می‌شود. یکی از نیازهای ثابت صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت هوافضا، بهبود دائمی استانداردهای ایمنی در آنها است که سبب شده تحقیقات گسترده‌ای بر روی آن انجام شود که از آن جمله می‌توان به تلاش در جهت افزایش مقاومت در برابر ضربه و جذب انرژی در چندلایه‌های فلز - الیاف اشاره نمود.

مطالعات زیادی بر روی تاثیر تغییر در ساختار مواد تشکیل‌دهنده و نیز خواص سطح میانی آلومینیوم و کامپوزیت در جهت افزایش مقاومت به ضربه در چندلایه‌های فلز - الیاف انجام شده است. وی‌لات [6] و وی‌لات و همکاران [7]، رفتار گلازها و آرال‌های مختلف را در مقابل ضربه مقایسه کردند. آنها نتیجه گرفتند که گلاز 3 به‌دلیل حساسیت به نرخ کرنش بالای الیاف شیشه، نسبت به آرال 2 مقاومت به ضربه بالایی دارد. یعقوبی و همکاران [8] رفتار مقاومت به ضربه گلاز 5 را در ساختار 3/2 در چیدمان‌های مختلف لایه‌ها بررسی کردند. آنها نشان دادند که لایه‌گذاری تک جهته کمترین مقاومت به ضربه را از خود نشان می‌دهد و بجای آن باید چیدمان متعامد و زاویه‌دار استفاده نمود.

مورینیر و همکاران [9] مقاومت به ضربه گلازها را به‌ازای زوایای الیاف مختلف و موقعیت لایه‌های آلومینیوم در صفحه مستطیلی بررسی نمودند. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی آنها نشان داد که برای چندلایه‌ها با بیش از دو لایه آلومینیوم، لایه‌چینی قطری لایه‌های کامپوزیت مقاومت به ضربه بالاتری را از خود نشان می‌دهند.

صدیقی و داریوشی [10] مقاومت به ضربه چندلایه‌های فلز - الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. آنها در بررسی خود نشان دادند که وجود الیاف صفر درجه خواص مقاومت به ضربه را بهتر می‌کند، محل قرارگیری لایه‌ها در انرژی جذب شده تاثیر بسزایی دارد و نیز افزایش تعداد لایه‌های آلومینیومی نسبت به تعداد لایه‌های کامپوزیتی خواص نمونه را بهتر بهبود می‌بخشد.

در پژوهشی دیگر، صدیقی و همکاران [11] خواص کششی چندلایه‌ها را به دو روش تجربی و تحلیلی بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که خواص این سازه‌ها با الیاف صفر درجه بطور چشمگیری افزایش می‌یابد و نشان دادند که شیوه شکست لایه‌ها به تفاوت زوایای الیاف در دو لایه کامپوزیتی وابسته است.

رجبی و کدخدایان [12] به بررسی خواص کششی و خمشی چندلایه‌های فلز - الیاف شیشه/کربن در مقایسه با آلومینیوم و کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه/کربن پرداختند. نتیجه حاصل از ارزیابی آنها نشان

<sup>1</sup> Arall (Aramid Reinforced Aluminum Laminates)

<sup>2</sup> Glare (Glass Reinforced aluminum laminates)



بررسی نشان داد پیروسی‌سازی برودتی بیشترین و پیروسی‌سازی رطوبتی-حرارتی کمترین اثر را در کاهش خواص ضربه‌ای این مواد داشته است. همچنین این بررسی نشان داد که در این مواد اثر افت خواص ضربه‌ای پیروسی بر اثر بهبود خواص نانورس برتری دارد.

در زمینه مدل‌سازی عددی رفتار چندلایه‌ها و کامپوزیت‌ها نیز کارهای بسیاری صورت گرفته است. پیرعلی و همکاران [29] پدیده نفوذ مایل پرتابه کالیبر متوسط ضدزره را بر روی اهداف مسطح گلیبر به روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند. آنها بررسی خود را در سرعت‌های برخورد 625 و 1250 متر بر ثانیه و زوایای برخورد 0، 30، 45 و 60 درجه انجام دادند و آسیب دیدگی ایجاد شده را ارزیابی نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که سرعت برخورد کمتر و زاویه برخورد بیشتر میزان آسیب را افزایش می‌دهد و پدیده‌هایی مانند پتالینگ متقارن و ایجاد ریزترک‌ها در برخورد مایل در قطعه به وجود می‌آید.

لاپزیک و هرتادو [30] مدل آسیب ناهمسانگردی برای پیش‌بینی واماندگی و رفتار پس از آن در مواد تقویت‌شده با الیاف ارائه نمودند. آنها رفتار ماده را پیش از آسیب با استفاده از روابط تنش صفحه‌ای مدل کردند. برای شروع آسیب از مدل هشین استفاده کردند و مدلی را بر اساس انرژی شکست تلف شده در طول آسیب ارائه نمودند که به کمک جابجایی معادل افزایش آسیب را کنترل می‌کند. مدل تکامل آسیب ارائه شده توسط آنها در تحلیل-های المان محدود، قابل پیاده سازی است.

شی و همکاران [31] آسیب ناشی از ضربه را در چندلایه کامپوزیتی با استفاده از یک مدل ترکیبی برای شروع آسیب بررسی نمودند و از مدل ارائه شده توسط لاپزیک و هرتادو برای تکامل آسیب استفاده کردند. آنها مدل آسیب خود را به کمک مدل‌سازی رفتار ماده در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی کردند. نتایج حاصل از بررسی آنان نشان داد که با اضافه کردن معیار دیگری به جای معیار آسیب فشاری فاز زمینه در مدل هشین می‌توان رفتار ماده را بهتر مدل نمود.

سیتیکو و همکاران [32] آسیب سوراخ‌شدگی ناشی از بار انفجاری شدید را بر روی چندلایه فلز - الیاف مدل نمودند. چندلایه بررسی شده در این پژوهش از آلومینیوم آلیاژی 2024، الیاف پارچه بافته شده و رزین پلی‌پروپیلن ساخته شده بود. آنها بررسی خود را به کمک مدل‌سازی رفتار ماده در نرم‌افزار آباکوس انجام دادند و نشان دادند که شبیه‌سازی آنها انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

شکریه و همکاران [33] شروع و پیش‌روی آسیب را در چندلایه کامپوزیتی دارای سوراخ تحت بار کششی به روش المان محدود شبیه‌سازی کردند. آنها با استفاده از مدل شروع و پیش‌روی هشین و مدل ناحیه چسبناک رفتار کامپوزیت را بررسی نمودند. آنها در این بررسی که به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت نشان دادند که استفاده از مدل ناحیه چسبناک برای مدل‌سازی تورق، نتایج دقیق‌تری را نسبت به رفتار ماده ارائه می‌دهد.

جمال‌امیدی و محمدی سوکی [34] عملکرد چندلایه‌های فلز - الیاف را تحت ضربه سرعت پایین به روش عددی بررسی کردند. آنها از سه مدل برای شبیه‌سازی استفاده کردند. در مدل اول از آسیب بین لایه‌های صرف‌نظر شد. در مدل دوم و سوم به ترتیب از روش المان چسبناک و سطح چسبناک برای مدل‌سازی استفاده نمودند. بررسی آنها نشان داد که با افزایش انرژی ضربه خطای مدل‌سازی بدون در نظر گرفتن آسیب بین لایه‌های افزایش می‌یابد و بهترین مدل‌سازی با روش سطح چسبناک بدست آمد.

در پژوهش حاضر، هدف این است که با استفاده از تغییر ریز ساختار و از

می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که بیشینه استحکام کششی به ازای 0.3 درصد اتفاق می‌افتد و مقادیر نانولوله بیشتر، مجدداً استحکام را کاهش می‌دهند.

همچنین کیووند و همکاران [23] میزان تقویت شونده‌گی گلاب را تحت بارگذاری خمشی بررسی کردند. آنها گلاب مورد بررسی را با درصدهای 0.1، 0.2، 0.3 و 0.5 از نانولوله تقویت کرده و نشان دادند که بیشترین تقویت شونده‌گی به میزان 25.7 و به‌ازای 0.3 درصد نانولوله کربنی به‌وجود می‌آید. در پژوهشی دیگر، اسلانی فارسانی و همکاران [24] اثر افزودن پودر شیشه به کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف بازالت در رفتار مقاومت به ضربه شاری، در دو حالت تخت و لبه، را بررسی کردند. برای بررسی جزئیات بیشتر رفتار پودر شیشه در ماتریس پلیمری، این آزمون در دو دمای مختلف انجام شد. علاوه بر این، اثر افزودن ترکیبات مختلفی از لایه‌های فلزی به کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف بازالت در مقابل ضربه شاری نیز بررسی شده است. نتیجه این تحقیق نشان داد که افزودن پودر شیشه به کامپوزیت مقاومت به ضربه را مخصوصاً در دمای بالا افزایش می‌دهد. همچنین مزیت چندلایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با لایه‌های فلزی در جذب انرژی نیز مشاهده شد.

نجفی و همکاران [25] خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های فلز - الیاف تقویت‌شده با نانورس که در معرض شوک حرارتی دما بالا قرار گرفته است را بررسی نمودند. آنها کامپوزیت‌ها و چندلایه‌های فلز - الیاف را تحت دمای 230 درجه قرار دادند و خواص ضربه‌ای آنها را قبل و بعد از شوک با هم مقایسه نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که وجود نانورس به حفظ خواص مقاومت به ضربه این مواد کمک به‌سزایی می‌کند. همچنین به‌دلیل وجود لایه‌های فلزی و نقش محافظتی آنها، خواص مقاومت به ضربه در چندلایه‌های فلز - الیاف در معرض شوک حرارتی کمتر افت می‌کند.

مسعودی و همکاران [26] اثر نانو مواد رسی بر خواص بالستیک گلاب را به صورت تجربی بررسی کردند. نمونه‌های آزمایش آنها از رویه آلومینیوم آلیاژی 2024 و هسته کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه تک جهته 409 گرم بر مترمربع و رزین CY 219 تشکیل شده است. این نمونه‌ها با 0، 4، 7 و 10 درصد وزنی نسبت به ماتریس از ذرات رسی کلوسیدسی‌بی تقویت شدند و با سرعت 205 و 225 متر بر ثانیه تحت آزمایش بالستیک قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی آنان نشان داد که در نمونه تقویت‌شده با 4 درصد نانورس جذب انرژی تغییر ناچیزی دارد اما با 7 و 10 درصد میزان انرژی جذب شده افزایش می‌یابد.

عمومی دیزجی و یزدانی پاسخ به ضربه سرعت پایین چندلایه کارال را که توسط نانوذرات سیلیکا و نانولوله کربنی چنددیواره تقویت شده بود مورد ارزیابی قرار دادند [27]. آنها نمونه خود را به روش انتقال رزین در قالب به وسیله خلا ساختند. نمونه آنها متشکل از دو لایه آلومینیوم آلیاژی 2024 و 11 لایه الیاف کربن با کسر حجمی 66 درصد بود و توسط دستگاه سقوط وزنه با انرژی 20، 40 و 60 ژول تحت ضربه قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که عملکرد نانولوله‌های کربنی در بهبود خواص ضربه‌ای بهتر از تاثیر نانو سیلیکا می‌باشد. چسبندگی و پخش شونده‌گی بهتر و همچنین ایجاد اتصال بین لایه‌های قوی از دلایل این برتری عنوان شده است.

نجفی و همکاران [28] اثر شرایط محیطی مختلف از قبیل پیروسی‌سازی برودتی در دمای 196- درجه سانتیگراد، پیروسی‌سازی دما بالا در دمای 130 درجه سانتیگراد و پیروسی‌سازی رطوبتی-حرارتی در آب مقطر 90 درجه سانتیگراد را بر روی گلاب تقویت‌شده با نانورس بررسی کردند. نتایج این

جدول 1 مشخصات فنی نانولوله‌های کربنی مورد استفاده [35]

مقدار	مشخصه
بیش از 95 درصد	درصد خلوص
2 درصد	درصد وزنی COOH
5-10 نانومتر	قطر داخلی
10-20 نانومتر	قطر خارجی
10-30 میکرومتر	طول
رسوب بخار	روش تولید

7500s ساخت شرکت پارس نهند قرار گرفت. مدت زمان هم‌زدن در التراسونیک 120 دقیقه در نظر گرفته شد که هر 20 دقیقه به مدت 5 دقیقه مجدداً با استفاده از هم‌زن مکانیکی عملیات اختلاط مکانیکی تکرار می‌شد. جهت جلوگیری از افزایش دمای رزین، که می‌تواند دلیل لرزش‌های فرکانس بالا اتفاق بیافتد، از مخلوط آب و یخ در حمام استفاده شد.

جهت آماده‌سازی سطح آلومینیوم برای چسبندگی بهتر، روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که از بین روش‌های سمباده‌زنی، اچ کردن با سود سوزآور و آندایز با محلول سولفوریک اسید، آندایز بهترین چسبندگی را ایجاد می‌کند. بر همین اساس، در ادامه پژوهش سطح تمامی آلومینیوم‌ها با استفاده از آندایز در محلول سولفوریک اسید 15 درصد آماده‌سازی شدند. شکل 2، تصاویر مربوط به نحوه آندایز ورق‌های آلومینیومی را نشان می‌دهد. آلومینیوم‌ها با جریان 1.4 آمپر و به مدت 60 دقیقه تحت آندایز قرار گرفتند تا سطح مناسبی برای چسبندگی بهتر به‌وجود آید.

با بررسی استانداردهای موجود مشخص شد که هنوز استاندارد مربوط به ضربه شاریبی برای چندلایه‌های فلز-الیاف ارائه نشده است. استانداردهای ضربه شاریبی مربوط به پلاستیک‌ها و یا فلزات هستند که در حالت بدون ناچ و همراه با ناچ نمونه‌ها را مورد آزمایش قرار می‌دهند. چندلایه‌های فلز-الیاف ترکیبی از این دو نوع ماده هستند و لذا در تحقیقات گذشته برای بررسی چنین سازه‌هایی از هر دو نوع استاندارد نیز استفاده شده است. با توجه به اینکه در حین ایجاد ناچ در نمونه‌های گلار لایه آلومینیومی در یک طرف به‌طور کامل بریده خواهد شد، از استاندارد بدون ناچ برای آزمون استفاده شد. بر همین اساس از استاندارد آزمون ضربه شاریبی ISO 179 برای بررسی انرژی جذب شده در نمونه‌ها استفاده شده است.

ابعاد نمونه طبق این استاندارد به ترتیب 2.5 میلی‌متر (ضخامت) در 15 میلی‌متر (عرض) در 62.5 میلی‌متر (طول) در نظر گرفته شد. برای هر کدام از نمونه‌های آزمون 6 تکرار در نظر گرفته شد تا نتایج از پایداری مناسبی



Fig. 2 Aluminum anodizing bath

شکل 2 وان آندایز آلومینیوم

طریق افزودن نانولوله‌های کربنی در کنار تقویت‌کننده الیاف شیشه، خواص مقاومت به ضربه گلارها بهبود یابد. بر این اساس، میزان انرژی جذب‌شده در ضربه سرعت پایین توسط آزمایش ضربه شاریبی بر روی گلار مورد بررسی قرار گرفته است و اثر افزودن نانولوله کربنی چنددیواره با درصد جرمی‌های مختلف (0.1، 0.2، 0.3 و 0.5) بر آن ارزیابی شده است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر رفتار گلار تحت ضربه شاریبی، نمونه بدون نانولوله کربنی به کمک روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس مدلسازی شده است و مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- آزمایش ضربه شاریبی

### 1-2- مواد

در پژوهش حاضر، برای فاز زمینه چندلایه فلز-الیاف از رزین اپوکسی KER 828 ساخت شرکت کوم‌هوی کره استفاده شده است. این رزین ویسکوزیته متوسطی دارد و بر پایه بیسفنول A و اپی‌کلروهیدرین ساخته می‌شود و هاردنر مورد استفاده در آن، تری‌اتیلن تترامین با نسبت اختلاط 15 به 100 است.

برای الیاف شیشه مورد استفاده جهت تقویت فاز زمینه، از پارچه شیشه بافته‌شده از گرید 400 گرم بر متر مربع با بافت ساده استفاده شده است. این الیاف محصول شرکت دونگیو فایبرگلاس چین و از نوع E-GLASS است و کرنش شکست بالا، قابلیت خیس شوندگی بالا، ایجاد چسبندگی خوب با ماتریس و قیمت پایین از ویژگی‌های این الیاف شیشه است.

در این پژوهش از نانولوله کربنی عامل‌دار با گروه عاملی کربوکسیل (COOH) محصول شرکت چیپ‌تیوب<sup>1</sup> آمریکا به‌عنوان تقویت‌کننده دوم استفاده شده است. شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌های کربنی مورد استفاده را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات فنی مربوط به این نانولوله‌ها در جدول 1 آمده است.

برای بخش فلزی چندلایه فلز-الیاف، از آلومینیوم آلیاژی 2024 با عملیات حرارتی T3 استفاده شده است. ضخامت این ورق 0.5 میلی‌متر است که طبق استاندارد گلارها، بیشترین ضخامت در استاندارد ورق‌ها می‌باشد.

### 2-2- روش ساخت

در این تحقیق، برای ساخت نمونه‌ها از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شده است. ابتدا نانولوله‌ها به نسبت وزنی 0.1، 0.2، 0.3 و 0.5 درون رزین ریخته شد و سپس با استفاده از هم‌زن مکانیکی با سرعت 1500 دور بر دقیقه به مدت 10 دقیقه مخلوط شد و در ادامه درون حمام التراسونیک پارسونیک



Fig. 1 SEM of used CNTs [35]

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانولوله‌های کربنی مورد استفاده [35]

<sup>1</sup> Cheaptube



3-1- شروع و گسترش آسیب در لایه‌های کامپوزیتی

رفتار کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف به‌گونه‌ای است که بدون ایجاد تغییر شکل پلاستیک دچار آسیب می‌شوند [30]. آغاز آسیب را می‌توان به‌صورت کاهش ضریب سفتی ماده در نظر گرفت. هشین چهار معیار آسیب کشش الیاف، فشار الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه را به‌شکل روابط (1) در نظر می‌گیرد [30]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 &= 1 \quad \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C}\right)^2 &= 1 \quad \hat{\sigma}_{11} \leq 0 \\ \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 &= 1 \quad \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\sigma}_{12}}{S^L}\right)^2 &= 1 \quad \hat{\sigma}_{22} \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $X^T, X^C, Y^T, Y^C, S^L, S^T$  و  $\alpha$  به‌ترتیب استحکام کششی طولی، استحکام فشاری طولی، استحکام کششی عرضی، استحکام فشاری عرضی، استحکام برشی طولی، استحکام برشی عرضی و ضریب تاثیر تنش برشی در شروع آسیب کششی الیاف است. همچنین  $\hat{\sigma}_{11}, \hat{\sigma}_{12}$  و  $\hat{\sigma}_{22}$  مولفه‌های تنش موثر هستند که با استفاده از رابطه (2) تعیین می‌شوند:

$$\hat{\sigma} = M\sigma \quad (2)$$

در این رابطه  $\sigma$  تنش حقیقی و  $M$  اپراتور آسیب است:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن  $d_f, d_m, d_s$  به‌ترتیب متغیرهای آسیب الیاف، زمینه و برش هستند. لاپزیک متغیرهای آسیب  $d_f^t, d_f^c, d_m^t, d_m^c$  را متناسب با چهار معیار شکست رابطه (1) معرفی کرد که مقادیر بین صفر (بدون آسیب) و یک (آسیب کامل) را می‌پذیرند و با متغیرهای موجود در رابطه (3) به‌شکل رابطه (4) در ارتباط هستند:

$$\begin{aligned} d_f &= \begin{cases} d_f^t & (\hat{\sigma}_{11} > 0) \\ d_f^c & (\hat{\sigma}_{11} < 0) \end{cases} \\ d_m &= \begin{cases} d_m^t & (\hat{\sigma}_{22} > 0) \\ d_m^c & (\hat{\sigma}_{22} < 0) \end{cases} \\ d_s &= 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c) \end{aligned} \quad (4)$$

پیش از شروع آسیب رفتار ماده به‌صورت الاستیک خطی است و ماتریس سفتی حالت تنش صفحه‌ای ماده ارتوتروپیک خواهد بود. به‌محض شروع آسیب، تنش در ماده به‌شکل  $\sigma = C_d \epsilon$  مدل می‌شود که در آن  $\epsilon$  کرنش و  $C_d$  ماتریس سفتی آسیب است [30] و طبق رابطه (5) تعریف می‌گردد:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} d_f^* E_1 & d_f^* d_m^* \nu_{21} E_1 & 0 \\ d_f^* d_m^* \nu_{12} E_1 & d_f^* E_2 & 0 \\ 0 & 0 & D d_s^* G_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن  $d_f^* = (1 - d_f), d_m^* = (1 - d_m), d_s^* = (1 - d_s)$  و  $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}$  مدول الاستیک و  $G_{12}$  مدول الاستیک و  $\nu_{12}$  و  $\nu_{21}$  ضریب پواسون ماده آسیب‌نپذیر هستند.

در مدل حاضر، نرم‌شوندگی لایه آسیب دیده به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است و نرخ اتلاف انرژی در طول فرآیند آسیب به‌شکل رابطه (6) است:

$$\dot{G}_c = Y_{ft} \dot{d}_f^t + Y_{fc} \dot{d}_f^c + Y_{mt} \dot{d}_m^t + Y_{mc} \dot{d}_m^c \quad (6)$$



Fig. 3 lay-up of specimens

شکل 3 لایه‌گذاری نمونه‌ها

برخوردار باشند. بنابراین نمونه‌های گلار تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به ابعاد 160 میلیمتر در 75 میلیمتر ساخته شد و از آن 6 نمونه تست به ابعاد گفته شده برش خورد. نمونه‌ها شامل 3 لایه آلومینیوم هستند که در بین هر دو لایه آلومینیوم، 4 لایه کامپوزیت قرار گرفته است.

پس از آماده‌سازی سطح آلومینیوم‌ها و مخلوط کردن نانولوله‌ها در درون اپوکسی، نمونه‌ها لایه‌چینی شد و در زیر قالب‌های فشار قرار گرفت. لازم به ذکر است که ایجاد فشار مناسب بر روی سطح چندلایه یکی از مهم‌ترین پارامترها در کیفیت ساخت آن‌ها به حساب می‌آید. شکل 3 و 4 به‌ترتیب نحوه لایه‌گذاری و قالب‌های فشار را به‌همراه تعدادی از نمونه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهند.

نمونه‌های ساخته‌شده به‌مدت 48 ساعت در زیر فشار قرار گرفتند و پس از آن جهت پخت تکمیلی به‌مدت 240 دقیقه در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در ادامه به ابعاد استاندارد برش خورده و مورد آزمون قرار گرفتند.

3- شیب سازی عددی

در این بخش نحوه مدل‌سازی ضربه شاری بر چندلایه فلز-الیاف شیشه به روش المان محدود در نرم افزار آباکوس بررسی شده است. در پژوهش حاضر از مدل شروع آسیب هشین و معیار پیش‌رونده آسیب، که بر اساس انرژی است، برای مدل‌سازی رفتار لایه‌های کامپوزیتی استفاده شده است. رفتار لایه آلومینیومی به کمک مدل جانسون-کوک شیب‌سازی شده است. همچنین جهت مدل‌سازی آسیب بین لایه‌ای و تورق نیز از قانون ساختاری کشش-جدایش بهره گرفته شده است.



Fig. 4 Pressure plates and fabricated specimens

شکل 4 صفحات فشار و نمونه‌های ساخته شده

### 4-3- شبیه‌سازی در آباکوس

همانطور که پیش از این نیز گفته شد برای مدل‌سازی المان محدود از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. برای این منظور چندلایه فلز - الیاف شیشه متشکل از 3 لایه آلومینیوم 2024-T3 و 16 لایه کامپوزیت مدل‌سازی شده است. لایه‌های کامپوزیتی موجود در مدل تجربی با الیاف پارچه بافته‌شده به‌صورت دو لایه مجزای [0/90] در نظر گرفته شده است. به‌منظور مدل‌سازی تورق، تمام لایه‌ها به‌طور مجزا طراحی شده‌اند و بین لایه‌ها سطح چسبنده لحاظ شده است.

برای مدل‌سازی رفتار لایه آلومینیوم از مدل جانسون-کوک استفاده شده است که خواص آن از مرجع [32] استخراج و در جدول 2 آمده است. برای مش‌بندی لایه آلومینیوم از المان سه‌بعدی آجری خطی C38DR که دارای 8 گره است استفاده شده است و خاصیت حذف المان برای آن فعال شده است. رفتار لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش هشین دوبعدی مدل شده است. خواص مربوط به آن لایه کامپوزیتی [30] در جدول 3 آمده است. مش‌بندی این لایه با استفاده از المان پوسته پیوسته C38R که دارای 8 گره می‌باشد، انجام شده است. برای مدل‌سازی تورق بین لایه‌ها با توجه به نتایج مطالعات گذشته [34] از اتصال چسبناک استفاده شده است. خواص مربوط به لایه چسبنده در جدول 4 آمده است [31].

ضربه‌زننده و تکیه‌گاه به‌صورت صلب مدل شده است و تماس بین آنها و مدل به‌صورت تماس سخت در نظر گرفته شده است. شکل 5 مدل طراحی شده را به‌همراه مش‌بندی آن نشان می‌دهد. در این مدل، ابعاد و هندسه ضربه‌زننده و تکیه‌گاه‌ها دقیقاً مشابه با دستگاه تست ضربه شاری طراحی شده است.

جدول 2 خواص مواد برای آلومینیوم 2024-T3 [32]

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
0.4	$n$	2690	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	$\dot{\epsilon}_0$	73.1	$E$ (GPa)
0.13	$d_1$	0.3	$\nu$
0.13	$d_2$	76	$A$ (MPa)
-1.5	$d_3$	210	$B$ (MPa)
0.011	$d_4$	0.05	$C$

جدول 3 خواص ارتوتروپیک اپوکسی تقویت‌شده با الیاف [30]

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
50	$Y^T$ (MPa)	55	$E_1$ (GPa)
150	$Y^C$ (MPa)	9.5	$E_2$ (GPa)
50	$S^L$ (MPa)	5.5	$G_{12}$ (GPa)
75	$S^T$ (MPa)	5.5	$G_{13}$ (GPa)
12.5	$G_{ft}$ (N/mm)	3	$G_{23}$ (GPa)
12.5	$G_{fc}$ (N/mm)	0.33	$\nu_{12}$
1	$G_{mt}$ (N/mm)	2500	$X^T$ (MPa)
1	$G_{mc}$ (N/mm)	2000	$X^C$ (MPa)

جدول 4 خواص چسبندگی اپوکسی [31]

مود III	مود II	مود I	
493.3	493.3	1373.3	مدول الاستیک نرماله (GPa/mm)
9.23	9.23	6.23	استحکام (MPa)
790	790	280	انرژی شکست (J/m <sup>2</sup> )

که در آن  $Y_{mc}$ ,  $Y_{mt}$ ,  $Y_{fc}$ ,  $Y_{ft}$  نیروهای ترمودینامیکی متناسب با مدهای شکست هستند و از رابطه (7) بدست می‌آیند:

$$Y_{ij} = \frac{\partial G}{\partial d_i^j} \quad (i, j) \in \{(f, t), (f, c), (m, t), (m, c)\} \quad (7)$$

که در آن  $G$  انرژی آزاد گیبس است [30].

در این روابط متغیرهای آسیب  $d_m^c$ ,  $d_m^t$ ,  $d_f^c$ ,  $d_f^t$  بر اساس انرژی تلف‌شده تعریف می‌شوند و با در نظر گرفتن یک جابجایی معادل بدست می‌آیند [30] که در اینجا به آن اشاره نمی‌شود.

### 2-3- مدل‌سازی رفتار و آسیب لایه آلومینیومی

با توجه به ماهیت آزمون ضربه، لحاظ کردن اثر نرخ کرنش در مدل‌سازی رفتار آلومینیوم حائز اهمیت است. به همین دلیل در این پژوهش از مدل وابسته به نرخ کرنش جانسون-کوک استفاده شده است که با رابطه (8) بیان می‌شود [32]:

$$\sigma = \left[ A + B(\bar{\epsilon}_{pl})^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (8)$$

که در آن  $A$ ,  $B$ ,  $C$  و  $n$  ثوابتی هستند که با استفاده از آزمایش به‌دست می‌آیند،  $\bar{\epsilon}_{pl}$  کرنش پلاستیک موثر،  $\dot{\epsilon}_{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک موثر و  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش مرجع است (معمولاً  $\dot{\epsilon}_0 = 1$  در نظر گرفته می‌شود). در رابطه (8) جمله مربوط به دما در نظر گرفته نشده است.

مدل آسیب دینامیکی جانسون-کوک از معیار  $\omega$  برای بررسی آسیب استفاده می‌کند که به‌شکل رابطه (9) تعریف می‌شود [32]:

$$\omega = \sum \left( \frac{\Delta \bar{\epsilon}_{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right) \quad (9)$$

که در آن  $\Delta \bar{\epsilon}_{pl}$  افزایش کرنش پلاستیک معادل و  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  نرخ کرنش آسیب است که به‌شکل رابطه (10) بدست می‌آید:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \eta)] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \quad (10)$$

در رابطه (10) ضرایب  $d_1$  تا  $d_4$  ثوابت ماده هستند و با آزمایش بدست می‌آیند.  $\eta$  پارامتر سه‌محوره بودن تنش است. بر اساس این معیار هنگامی که  $\omega$  بزرگتر از یک شود ماده دچار آسیب خواهد شد.

### 3-3- جدایش لایه‌ها

برای مدل‌سازی جدایش بین لایه‌های کامپوزیت و همچنین جدایش بین کامپوزیت و آلومینیوم از قانون ساختاری کشش-جدایش استفاده شده است. در این قانون، شروع آسیب با استفاده از یک رابطه درجه دوم از معیار تنش نامی به‌شکل رابطه (11) تعریف می‌شود:

$$\left[ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right]^2 + \left[ \frac{\langle t_s \rangle}{t_s^0} \right]^2 + \left[ \frac{\langle t_t \rangle}{t_t^0} \right]^2 = 1 \quad (11)$$

که در آن پراتنز ماکولی  $\langle x \rangle = (x + |x|)/2$  به‌شکل  $\langle x \rangle$  به‌شکل  $\langle x \rangle = (x + |x|)/2$  تعریف می‌شود.  $t_n$ ,  $t_s$  و  $t_t$  تنش عمودی و برشی موجود در ناحیه چسبندگی و  $t_n^0$  و  $t_s^0$  تنش عمودی و برشی بیشینه قابل تحمل توسط چسب است. تکامل آسیب با رابطه توانی (12) قابل بیان است (توان یک):

$$\left[ \frac{G_n}{G_n^c} \right] + \left[ \frac{G_s}{G_s^c} \right] + \left[ \frac{G_t}{G_t^c} \right] = 1 \quad (12)$$

که در آن  $G_n$ ,  $G_s$  و  $G_t$  کار انجام شده توسط نیروهای کششی و برشی در جهت عمود و مماس بر سطح چسبنده است و  $G_n^c$ ,  $G_s^c$  و  $G_t^c$  مقادیر بحرانی انرژی شکست در ناحیه چسبنده می‌باشد.



استحکام چسبندگی بین پلیمر استفاده شده و لایه آلومینیوم نیز به‌واسطه وجود نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. در نتیجه نیرو به‌خوبی بین لایه فلزی و الیاف منتقل می‌شود و رشد ترک‌های ایجاد شده، به‌واسطه وجود الیاف متصل‌کننده به تاخیر می‌افتد [22].

نتایج حاصل از نمودار شکل 6 و جدول 5 نشان می‌دهد که اضافه کردن نانولوله کربنی به اندازه 0.1 درصد، اثر تقویتی ناچیز (0.8 درصد) بر انرژی جذب شده در گلار دارد. می‌توان گفت که افزودن این میزان از نانولوله کربنی به‌خوبی نتوانسته است میان الیاف مجاور و نیز خود رزین پیوند محکمی برقرار کند و میزان آن برای اثرگذاری در انرژی جذب‌شده در آزمون ضربه شاری ناچیز بوده است.

با افزایش نانولوله کربنی به میزان 0.2 درصد، جذب انرژی تا 6.7 درصد افزایش می‌یابد. این میزان از جذب انرژی در 0.3 درصد نانولوله کربنی به حداکثر خود (14.36 درصد) می‌رسد و با افزایش درصد نانولوله تا 0.5 درصد، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. علت افت خواص مقاومت به ضربه در این مقدار از نانولوله کربنی می‌تواند ناشی از اختلاط نامناسب نانولوله‌ها در رزین باشد که با کلوخه شدن آنها همراه خواهد بود. این اتفاق که باعث افزایش تردی رزین تقویت‌شده می‌شود، خواص جذب انرژی آن را کاهش می‌دهد [25].

انرژی وارد شده به چندلایه باید از طریق مکانیزم‌های مختلف آزاد شود تا از شکست ناگهانی سازه‌ها، که در نتیجه آغاز و رشد ترک اتفاق می‌افتد، جلوگیری کند. اختلاف موجود در انرژی جذب شده را می‌توان به نحوه شکست و تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در چندلایه‌ها مرتبط دانست. جهت بررسی رفتار جذب انرژی چندلایه‌های مورد بررسی، مکانیزم شکست آنها ارزیابی شده است.

شکل 7 نمونه شاهد (بدون نانولوله کربنی) را نشان می‌دهد که تحت ضربه شاری قرار گرفته است. همانطور که گفته شد نمونه‌ها از پارچه شیشه بافته شده ساخته اند. جهت‌گیری الیاف به‌گونه‌ای است که تار الیاف در جهت 0 درجه و پود آنها در جهت 90 درجه قرار گرفته‌اند. وجود الیاف در جهت 0 درجه باعث شده است که مقاومت نمونه‌ها افزایش یابد [10]. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، لایه آلومینیوم پشتی نمونه (مورد اصابت مستقیم چکش) دچار کماتش محلی شده است و بدین وسیله بخشی از انرژی را جذب نموده‌اند. وجود الیاف تار 0 درجه در لایه جلویی چندلایه سبب بازگشت موج ضربه و به‌وجود آمدن این پدیده شده است. نتایج مشابهی در بررسی ضربه مربوط به گلارها توسط صدیقی و داریوشی [10] بدست آمده است.

وجود تغییر شکل پلاستیک لایه آلومینیومی در بخش‌های میانی ورق، هم در قسمت جلو و هم در قسمت پشتی و جدایش محدود در لایه پشتی چندلایه، مشهود است که بخشی از جذب انرژی را به خود اختصاص داده است. همچنین آلومینیوم لایه جلویی دچار پارگی شده است که دلیل آن را می‌توان وجود الیاف پود 90 درجه دانست که انرژی را مستقیماً به آلومینیوم مجاور منتقل می‌کند و مقاومتی در برابر کشیده‌شدن ناحیه جلویی نمونه از خود نشان نمی‌دهد [11]. البته لازم به ذکر است که به‌دلیل بافته بودن الیاف مورد استفاده به‌راحتی نمی‌توان از الیاف 0 و 90 درجه به‌طور مجزا صحبت نمود اما می‌توان علت به‌وجود آمدن این پدیده را وجود رفتاری شبیه به الیاف 90 درجه مجزا دانست که در دل پارچه بافت ساده نهفته است.

علاوه بر موارد ذکر شده، شکستگی در لایه کامپوزیت پشتی نیز قابل مشاهده است که این امر نیز به جذب انرژی کمک کرده است [10].

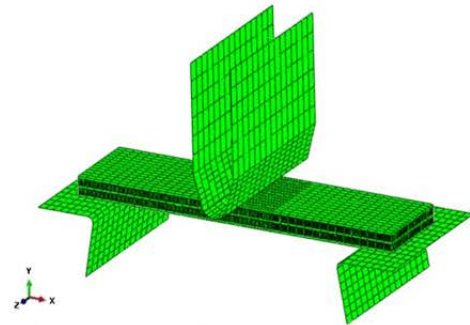


Fig. 5 Finite element model used in Abaqus

شکل 5 مدل المان محدود استفاده شده در آباکوس

#### 4- بررسی و نتایج

جدول 5 نتایج مربوط به آزمون ضربه شاری را برای نمونه‌های آزمایش شده نشان می‌دهد. نمونه‌ها در 5 دسته و از هر دسته 6 نمونه آزمایش شده است. ضریب‌تغییرات بدست آمده نشان‌دهنده عدم پراکندگی داده‌ها و دقت مناسب آزمون انجام شده است. شکل 6 نمودار مربوط به جذب انرژی گلارها را به‌ازای 0، 0.1، 0.2، 0.3 و 0.5 درصد جرمی نانولوله کربنی تحت ضربه شاری نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار مشخص است، با افزودن نانولوله کربنی، انرژی جذب شده ابتدا تا 14.36 درصد افزایش می‌یابد و سپس مجدداً دچار افت می‌شود. نانولوله‌های کربنی با ایجاد اتصال قوی میان رزین اپوکسی و الیاف شیشه بر انرژی جذب شده در ضربه تاثیر مثبت گذاشته است. همچنین وجود نانولوله‌های کربنی چند دیواره، که طول آن نیز بلند است، باعث افزایش چسبندگی بین الیاف مجاور می‌شود. این موضوع قبلاً توسط واریر و همکاران بررسی شده است [36]. در نتیجه، این امر جدایش بین لایه‌ها و الیاف را به تاخیر انداخته و کرنش بحرانی را افزایش می‌دهد و به افزایش استحکام چندلایه‌ها کمک می‌کند [19].

از طرف دیگر بررسی جوجیبابو و همکاران [37] نشان داده است که

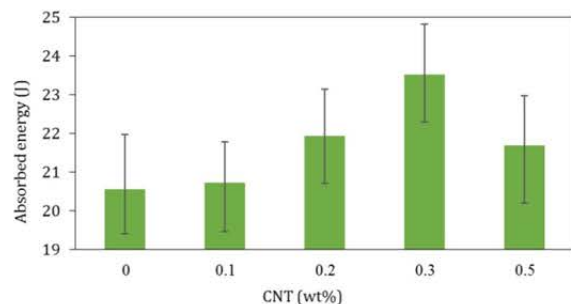


Fig. 6 Energy absorption vs wt% of CNTs

شکل 6 انرژی جذب شده برحسب درصد جرمی نانولوله‌های کربنی

جدول 6 نتایج آزمون ضربه شاری

Table 5 Charpy impact test results

میزان نانولوله (درصد)	انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌های هر دسته (ژول)	میانگین انرژی (ژول)	تغییرات (درصد)
0	19.41	21.97	20.31
0.1	20.56	19.73	19.46
0.2	21.47	21.30	20.71
0.3	22.29	24.82	22.65
0.5	22.10	21.29	20.19

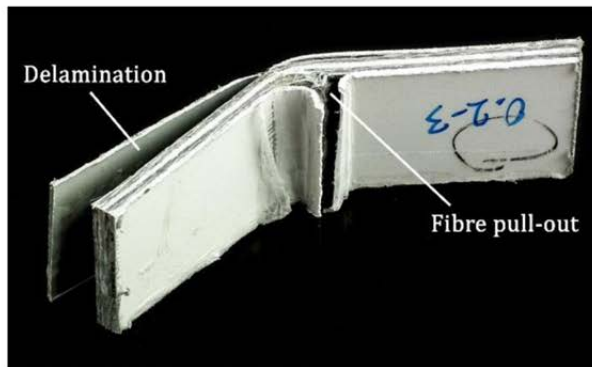


Fig. 9 GLARE with 0.2 wt% of CNTs

شکل 9 گلار تقویت شده با 0.2 درصد نانولوله کربنی

تغییر شکل پلاستیک و گسیختگی شده است. لایه آلومینیوم پشتی نیز در اثر بازگشت موج ضربه دچار کماتش محلی و در نهایت گسیختگی شده است که شدت آن نسبت به دو مورد قبل بیشتر است. علاوه بر آن، شکستگی کامل و بیرون‌زدگی الیاف در لایه‌های کامپوزیتی جلویی و پشتی نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود. حضور این مکانیزم‌های جذب انرژی باعث شده است که این چندلایه بیشترین مقاومت را بین نمونه‌های مطرح شده از خود نشان دهد و انرژی بیشتری را به‌وسیله تغییر شکل‌های بیان شده جذب نماید.

در نهایت با افزایش درصد نانولوله از 0.3 درصد به 0.5 درصد، میزان جذب انرژی، کاهش یافته است. با نگاهی به مکانیزم‌های جذب انرژی در این دسته از نمونه‌ها (شکل 11) می‌توان دید که این نمونه‌ها از طریق کماتش محلی و گسیختگی لایه آلومینیوم پشتی، تغییر شکل پلاستیک و گسیختگی محدود لایه آلومینیوم جلویی و تورق لایه کامپوزیتی پشتی انرژی وارد به خود را جذب کرده است. در مقایسه این موارد با موارد مشاهده شده برای نمونه دارای 0.3 درصد نانولوله کربنی می‌توان دید که مکانیزم‌های درگیر در جذب انرژی و میزان انرژی جذب شده توسط هر کدام کمتر بوده است. از این رو میزان کل انرژی جذب شده نیز کاهش یافته است.

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، این اختلاف رفتار می‌تواند ناشی از اختلاط نامناسب نانولوله‌های کربنی و در نتیجه تردشدگی لایه کامپوزیتی باشد [23، 25]. عدم چسبندگی مناسب بین الیاف لایه کامپوزیتی را می‌توان به‌خوبی در تورق لایه کامپوزیتی پشتی ملاحظه نمود.

نکته دیگری که در مورد مکانیزم‌های جذب انرژی در مجموع نمونه‌های آزمایش شده می‌توان به آنها اشاره نمود، زاویه انحراف نمونه‌ها پس از اعمال ضربه است. شکل 12 نمونه‌های آزمایش شده را در کنار یکدیگر قرار می‌دهد.



Fig. 10 GLARE with 0.3 wt% of CNTs

شکل 10 گلار تقویت شده با 0.3 درصد نانولوله کربنی

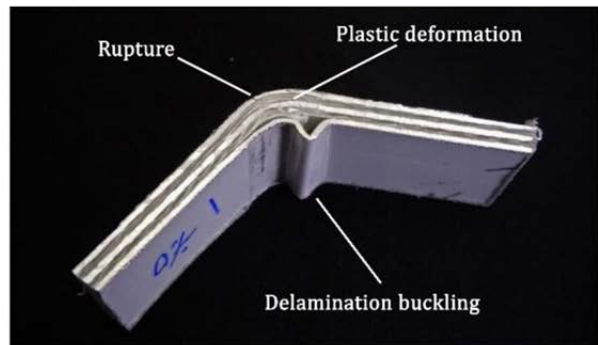


Fig. 7 Unreinforced GLARE

شکل 7 گلار تقویت‌نشده

با افزودن 0.1 درصد نانولوله کربنی، تورق و کماتش محلی ناشی از بازگشت موج ضربه در آلومینیوم لایه پشتی و شکستگی در کامپوزیت لایه پشتی به‌عنوان مکانیزم‌های شکست چندلایه مشاهده می‌شود (شکل 8).

علاوه بر آن، لایه آلومینیوم جلویی به‌طور کامل جدا شده است و الیاف در کامپوزیت لایه جلویی دچار بیرون‌زدگی شده‌اند. همین امر میزان انرژی جذب شده را افزایش داده است اما چون انرژی جذب شده توسط لایه‌ای که به‌طور یکپارچه جدا شده است زیاد نیست [38]، تاثیر آن در مقاومت به ضربه چشمگیر نبوده است (0.8 درصد).

همانطور که در شکل 9 دیده می‌شود، با افزایش میزان نانولوله کربنی از 0.1 درصد به 0.2 درصد کماتش محلی ناشی از بازگشت موج ضربه، شکستگی و بیرون‌زدگی الیاف در لایه کامپوزیت پشتی بخشی از انرژی ضربه را جذب کرده‌اند. تغییر شکل پلاستیک لایه آلومینیوم جلویی و جدا شدن نیمی از آن بخش دیگری از جذب انرژی توسط چندلایه را به خود اختصاص داده است.

در مقایسه با نمونه تقویت شده با 0.1 درصد نانولوله کربنی، در این نمونه آلومینیوم لایه پشتی در اثر شدت موج بازگشتی ضربه دچار گسیختگی شده است و همچنین لایه آلومینیوم جلویی از محل جدا شده دچار پارگی کامل شده است. این موارد باعث شده است که انرژی جذب شده در چندلایه با افزایش میزان نانولوله موجود در آن، افزایش یابد.

هنگامی که میزان نانولوله کربنی موجود در چندلایه به 0.3 درصد می‌رسد میزان انرژی جذب شده بین نمونه‌ها بیشینه (14.36 درصد) است. شکل 10 نحوه تغییر شکل این نمونه را پس از آزمون ضربه شاریبی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، آلومینیوم لایه جلویی دچار

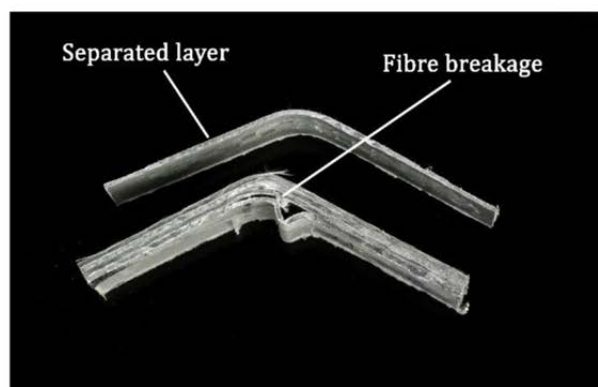


Fig. 8 GLARE with 0.1 wt% of CNTs

شکل 8 گلار تقویت شده با 0.1 درصد نانولوله کربنی



شکل 13 نحوه آسیب و تغییر شکل قطعه مدل‌سازی شده را پس از ضربه نشان می‌دهد. تغییر شکل پلاستیک لایه‌های آلومینیوم و پارگی لایه آلومینیوم پشتی در مدل مشاهده می‌شود. تورق و شکست لایه کامپوزیتی پشتی و تا حدودی جلویی نیز به خوبی قابل مشاهده است. علاوه بر این می‌توان به جدایش لایه کامپوزیت پشتی از آلومینیوم پشتی و کامپوزیت لایه جلویی از آلومینیوم میانی اشاره نمود.

با مقایسه مکانیزم‌های آسیب ایجاد شده در مدل‌سازی عددی با نمونه آزمایش شده (شکل 7) می‌توان ملاحظه نمود که حل عددی، رفتار نمونه آزمایش شده را به‌طور مطلوبی شبیه‌سازی کرده است. برای بررسی دقیق‌تر، میزان انرژی جذب‌شده توسط نمونه مدل‌شده با توجه به افت سرعت ضربه‌زننده در شکل 14 رسم شده است، این نمودار انرژی ضربه‌زننده را در طول فرآیند ضربه نشان می‌دهد. اختلاف انرژی نقاط ابتدا و انتهای نمودار، میزان انرژی جذب‌شده توسط نمونه را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، مقدار انرژی جذب شده 21.22 ژول می‌باشد. این میزان جذب انرژی با مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش (20.56) حدود 3.2 درصد خطا را نشان می‌دهد که انطباق بسیار خوب مدل‌سازی با نتایج آزمایش را مشخص می‌کند. با توجه به بررسی انجام شده توسط جمال‌امیدی و محمدی سوکی [34] یکی از دلایل خطای کم ناشی از این مدل‌سازی را می‌توان بکارگیری روش سطح چسبناک برای مدل‌سازی تورق دانست.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نمونه‌های گلار با ساختاری شامل سه لایه آلومینیوم و دو لایه کامپوزیت، که از چهار لایه الیاف شیشه بافت ساده تشکیل شده است، ساخته



Fig. 11 GLARE with 0.5 wt% of CNTs

شکل 11 گلار تقویت شده با 0.5 درصد نانولوله کربنی

در این شکل نمونه‌های گفته شده به ترتیب از پایین به بالا چیده شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود زاویه انحراف نمونه‌ها از 180 درجه، در نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی 0.1، 0.2 و 0.3 به ترتیب کاهش یافته است و در نمونه حاوی 0.5 درصد نانولوله کربنی افزایش یافته است. کاهش زاویه می‌تواند ناشی از تقویت مناسب لایه کامپوزیتی، افزایش کرنش شکست و در نتیجه افزایش مقاومت به شکست لایه کامپوزیت اتفاق افتاده باشد. این مولفه در نمونه دارای 0.5 درصد نانولوله کمتر است و می‌تواند شهادی از تقویت نامناسب لایه کامپوزیتی چندلایه باشد. با این حال افزایش زاویه انحراف که با تغییر شکل لایه‌های مختلف گلار همراه است به جذب انرژی کمک می‌کند. اما همانطور که دیده می‌شود این تغییر شکل نمونه‌ها مقدار کمی در جذب انرژی سهم داشته‌اند. زاویه خمش و بررسی رفتار آن در گلارها پیش از این توسط صدیقی و داریوشی [38] انجام پذیرفته است.

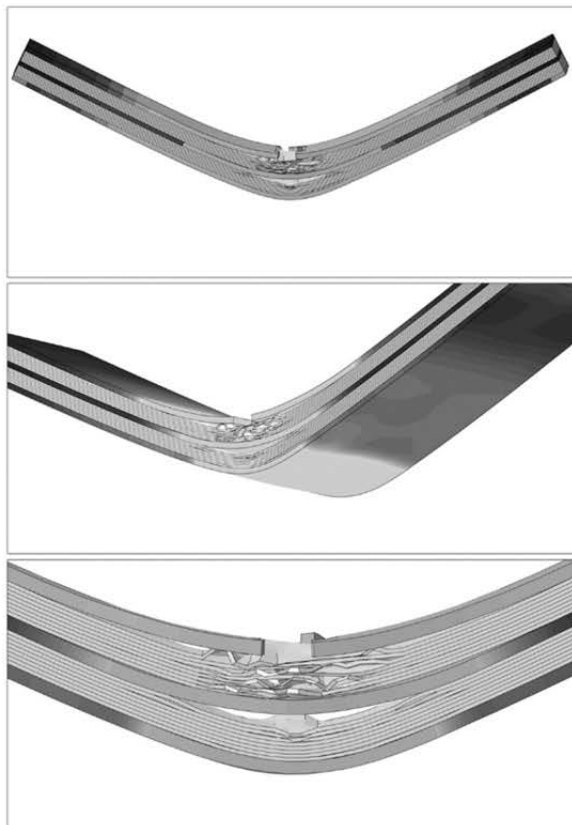


Fig. 13 Different views of finite element model of impact damage

شکل 13 نماهای مختلف آسیب ضربه در مدل المان محدود

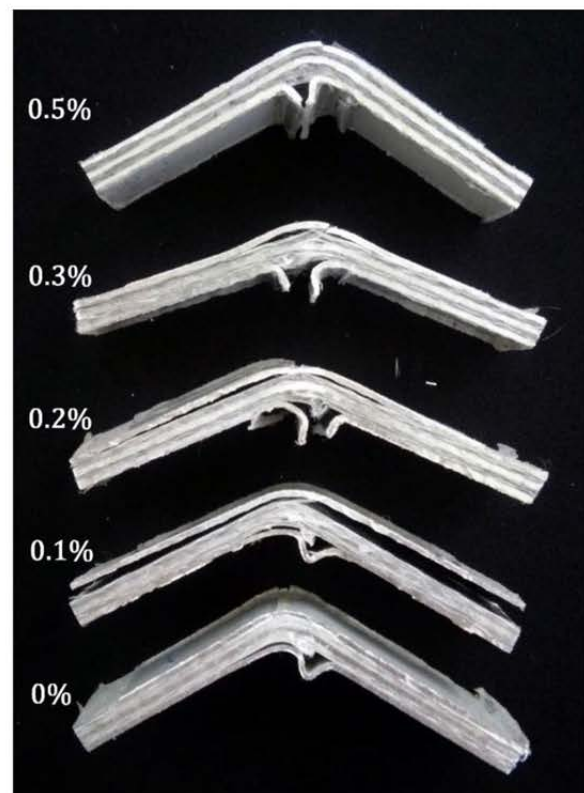


Fig. 12 Angle of GLAREs

شکل 12 زاویه گلارها

[6] A. Vlot, Impact properties of Fibre Metal Laminates, *Composites Engineering*, Vol. 3, No. 10, pp. 911-927, 1993.

[7] A. Vlot, M. Krull, Impact damage resistance of various fibre metal laminates, *Le Journal de Physique IV*, Vol. 7, No. C3, pp. 1045-1050, 1997.

[8] A. Seyed Yaghoubi, Y. Liu, B. Liaw, Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE 5 (3/2) Fiber-Metal Laminates, *Journal of thermoplastic composite materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 223-247, 2012.

[9] F. Moriniere, R. Alderliesten, R. Benedictus, Development of fibre-metal laminates for improved impact performance, *The European Physical Journal-Special Topics*, Vol. 206, No. 1, pp. 79-88, 2012.

[10] M. Sadighi, S. Darushi, An experimental study on impact behavior of Fiber/Metal Laminates, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 315-327, 2008. (in Persian فارسی)

[11] M. Sadighi, M. Tajdari, S. Dariushi, An investigation on tensile properties of glass fiber/aluminium laminates, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 31-39, 2009. (in Persian فارسی)

[12] A. Rajabi, M. Kadkhodayan, Experimental investigation of the advantages of FMLs compared to metal and composite plates, *Proceeding of The 10th Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, 1-3 March, 2011. (in Persian فارسی)

[13] D. Alhazov, E. Zussman, Study of the energy absorption capabilities of laminated glass using carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 6, pp. 681-687, 2012.

[14] J. Suhr, N. A. Koratkar, Energy dissipation in carbon nanotube composites: a review, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, No. 13, pp. 4370-4382, 2008.

[15] V. Kostopoulos, A. Baltopoulos, P. Karapappas, A. Vavouliotis, et al., Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 4, pp. 553-563, 2010.

[16] L. c. Tang, H. Zhang, X. p. Wu, Z. Zhang, A novel failure analysis of multi-walled carbon nanotubes in epoxy matrix, *The International Journal for the Science and Technology of Polymers*, Vol. 52, No. 9, pp. 2070-2074, 2011.

[17] H. Zhang, S. Gn, J. An, Y. Xiang, et al., Impact behaviour of GLAREs with MWCNT modified epoxy resins, *Experimental Mechanics*, Vol. 54, No. 1, pp. 83-93, 2014.

[18] A. Masoudi, G. Lighat, M. H. Pol, Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE - Experimental and numerical investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 43-51, 2014. (in Persian فارسی)

[19] M. M. Shokrieh, A. Zeinedini, S. M. Ghoreishi, Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 125-133, 2015. (in Persian فارسی)

[20] A. Ramezani Parsa, R. Esalimi Farsani, Influence of pre strain shape memory alloy wire on impact properties of smart fibers metal composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 322-330, 2017. (in Persian فارسی)

[21] M. Khansari, H. Khodarahmi, A. Vaziri, Experimental study of ballistic properties of hybrid aluminum and epoxy matrix composite reinforced with carbon nanotube, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 126-132, 2017. (in Persian فارسی)

[22] E. Kaboudvand, R. Eslami Farsani, H. Khosravi, Influence of MWCNTs on tensile behavior of fiber metal laminates, *Proceeding of The 1st International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, April 14, 2016. (in Persian فارسی)

[23] E. Kaboudvand, R. Eslami Farsani, H. Khosravi, Influence of MWCNTs on flexural behavior of fiber metal laminates, *Proceeding of The 2th International Conference on New Research achievements in Mechanics, Industrial and Aerospace Engineering*, October 7, 2016. (in Persian فارسی)

[24] R. Eslami Farsani, S. Khalili, V. Daghigh, Charpy impact response of basalt fiber reinforced epoxy and basalt fiber metal laminate composites: Experimental study, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 23, No. 6, pp. 729-744, 2013.

[25] M. Najafi, A. Darvizeh, R. Ansari, Evaluation of impact strength of composites and fiber metal laminates hybridized with nanoclay after exposure to high temperature thermal shock, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 263-274, 2017. (in Persian فارسی)

[26] A. Masoudi, G. H. Lighat, M. H. Pol, Experimental investigation of effects of nanoclay on ballistic properties of GLARE, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 141-146, 2014. (in Persian فارسی)

[27] R. Amooyi Dizaji, M. Yazdani, Low velocity impact response of CARALL composites reinforced with nano particles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 58-64, 2017. (in Persian فارسی)

[28] M. Najafi, R. Ansari, A. Darvizeh, Effect of different environmental conditions on impact properties of FMLs hybridized with nanoclay, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 193-203, 2018. (in Persian فارسی)

[29] P. Pirali, M. Ghadami, R. Babaei, Numerical investigation of the damaged area of GLARE® under oblique impact of the AP projectile with medium

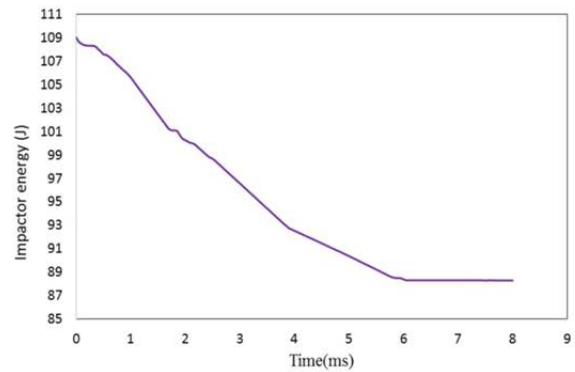


Fig. 14 GLARE with 0.2 wt% of CNTs

شکل 14 گلار تقویت شده با 0.2 درصد نانولوله کربنی

شد و مورد آزمایش ضربه شاری قرار گرفت. برای آماده‌سازی سطح آلومینیوم از روش آندایز در وان سولفوریک اسید استفاده شد. نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی چنددیواره (0.1، 0.2، 0.3 و 0.5) تقویت شدند و مقدار انرژی جذب شده در آنها نسبت به نمونه شاهد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که

- میزان جذب انرژی در گلارها با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی افزایش می‌یابد.
- با اضافه کردن تنها 0.3 درصد نانولوله کربنی میزان انرژی جذب‌شده حدود 14 درصد افزایش می‌یابد.
- بیشینه جذب انرژی در میان نمونه‌های بررسی شده به‌ازای 0.3 درصد نانولوله کربنی بدست می‌آید و با افزایش میزان نانولوله کربنی در رزین، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.
- مقایسه مدهای شکست گلارها به‌ازای افزودن نانولوله کربنی نشان می‌دهد که میزان چسبندگی لایه کامپوزیتی به لایه آلومینیومی با افزایش درصد نانولوله‌ها بهبود می‌یابد.
- با افزایش میزان نانولوله کربنی موجود در چندلایه‌ها زاویه انحراف نمونه از حالت تخت کاهش می‌یابد که این مشاهده می‌تواند نتیجه افزایش سفتی لایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده باشد. همچنین افزایش این زاویه در نمونه حاوی 0.5 درصد نانولوله کربنی می‌تواند ناشی از کلوخه‌شدن نانولوله‌ها در لایه کامپوزیتی باشد که همین امر باعث کاهش انرژی جذب شده در این نمونه‌ها شده است.
- نتایج حاصل از بررسی عددی مکانیزم‌های آسیب ایجاد شده در گلار را به‌خوبی نشان می‌دهد. استفاده از سطح چسبناک باعث شده است که خطای مدلسازی به‌خوبی کاهش یابد و انرژی جذب‌شده در گلار با کمترین خطا پیش‌بینی شود.

## 6- مراجع

[1] R. Alderliesten, J. Homan, Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 10, pp. 1116-1123, 2006.

[2] A. Vlot, *Glare: history of the development of a new aircraft material*, pp. 39-45, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[3] G. Wu, J. M. Yang, The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures, *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 57, No. 1, pp. 72-79, 2005.

[4] T. De Vries, A. Vlot, F. Hashagen, Delamination behavior of spliced fiber metal laminates. Part 1. Experimental results, *Composite structures*, Vol. 46, No. 2, pp. 131-145, 1999.

[5] A. Vlot, L. Voeglesang, T. De Vries, Towards application of fibre metal laminates in large aircraft, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 71, No. 6, pp. 558-570, 1999.



- [34] M. Jamal-Omidi, M. R. Mohammadi Suki, Numerical investigation of the behavior of FML composite plates under low velocity impact, *Journal of Energetic Materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 23-38, 2016. (in Persian فارسی)
- [35] *Multi Walled Carbon Nanotubes 10-20nm*, Accessed 20 April, 2018; <https://www.cheaptubes.com/product/multi-walled-carbon-nanotubes-10-20nm/>.
- [36] A. Warriar, A. Godara, O. Rochez, L. Mezzo, et al., The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 4, pp. 532-538, 2010.
- [37] P. Jajibabu, M. Jagannatham, P. Haridoss, G. J. Ram, et al., Effect of different carbon nano-fillers on rheological properties and lap shear strength of epoxy adhesive joints, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 82, pp. 53-64, 2016.
- [38] S. Dariushi, M. Sadighi, An experimental study of the fibre orientation and laminate sequencing effects on mechanical properties of Glare, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 222, No. 7, pp. 1015-1024, 2008.
- caliber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 367-375, 2017. (in Persian فارسی)
- [30] I. Lapczyk, J. A. Hurtado, Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 11, pp. 2333-2341, 2007.
- [31] Y. Shi, T. Swait, C. Soutis, Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 9, pp. 2902-2913, 2012.
- [32] E. Sitnikova, Z. W. Guan, G. K. Schleyer, W. J. Cantwell, Modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to high impulsive blast loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 18, pp. 3135-3146, 2014.
- [33] M. M. Shokrieh, M. Ghajar, M. Salamattalab, R. Madoliat, Progressive damage modeling of laminated composites by considering simultaneous effects of interlaminar and intralaminar damage mechanisms, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2015. (in Persian فارسی)