



## بررسی تجربی رفتار ساختارهای الیاف-فلز حاوی نانو ذرات تحت ضربه سرعت پایین مکرر

توحید میرزابابای مستوفی<sup>۱\*</sup>، وحید شریفی<sup>۲</sup>، مصطفی سیاح بادخور<sup>۱</sup> و هاشم بابایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان کی، ایوان کی، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

### چکیده

گلر دسته‌ای از کامپوزیت‌های الیاف-فلز است که در آن از ورق‌های با جنس آلیاژ آلومینیوم، همراه با لمینیت‌های کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌هایی از جنس شیشه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله، ورق‌هایی از نوع گلر، تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین مکرر با انرژی ۱۵۰ ژول، قرار گرفتند. کارهای تجربی توسط دستگاه سقوط وزنه، انجام شد. برای ساخت نمونه‌ها، از ورق‌های آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت ۱ میلی‌متر به عنوان صفحات رویی و همچنین هسته از جنس کامپوزیت شیشه-اپوکسی استفاده شد. لمینیت شیشه-اپوکسی مورد استفاده نیز، متشکل از پنج لایه الیاف شیشه تک‌جهته نوع E در رزین اپوکسی بود. علاوه بر این، نانو ذرات سیلیکا با خلوص ۹۹/۹٪ به ماده زمینه اضافه شد. به منظور بررسی تأثیر اضافه کردن این نانو ذرات بر رفتار کامپوزیت‌های الیاف-فلز، تحت ضربه سرعت پایین مکرر، در نمونه‌های ساخته شده، نانو ذرات سیلیکا با درصد وزنی ۰ تا ۴٪ به ماتریس اضافه شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که از نظر مقاومت به ضربه، نمونه دارای ۱٪ نانو ذرات، عملکرد بهتری از خود نشان داد، به طوری که پس از پنج مرتبه اعمال بار، آسیب جدی در آن ایجاد نشد؛ اما در نمونه‌های دارای ۳٪ و ۴٪ نانو ذره، در مرحله دوم اعمال بار، سوراخ شدگی در اتفاق افتاد.

**کلمات کلیدی:** آزمایش تجربی؛ گلر؛ نانو ذرات سیلیکا؛ ضربه مکرر؛ سامانه سقوط وزنه.

## Experimental Investigation into the Behaviour of FMLs Containing Nanoparticles under Repeated Low-velocity Impact

T. Mirzababaei Mostofi<sup>1\*</sup>, V. Sharifi<sup>2</sup>, M. Sayah-Badkhor<sup>1</sup>, H. Babaei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

<sup>2</sup> MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### Abstract

GLARE is a kind of fiber-metal composites in which aluminum alloy sheets are used, along with composite laminates with glass reinforcements. In this paper, Glare FMLs were subjected to repeated low-velocity impact loading with an energy of 150 J. Repeated low-velocity impacts were applied using a drop-weight testing machine. To fabricate testing specimens, 2024-T3 aluminum alloy plates with a thickness of 1 mm as the face-sheets as well as the core made of the glass-epoxy composite were used. The epoxy glass laminate used also consisted of five layers of E-type single-sided glass fibers in the epoxy resin. Besides, 99.9% purity silica nanoparticles were added to the base material. To investigate the effect of adding nanoparticles on the behavior of FMLs under repeated low-velocity impacts, silica nanoparticles with a weight percentage of 0 to 4% were added to the matrix of the fabricated samples. The experimental results showed that the sample with 1% nanoparticles had better performance in terms of impact resistance so that after five loads, it was not seriously damaged; however, the perforation phenomenon occurred for samples with 3% and 4% nanoparticles in the second impact load.

**Keywords:** Experimental Study; GLARE; Silica Nanoparticles; Repeated Impact; Drop-Hammer Machine.

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های FML<sup>۱</sup> از ترکیب لایه‌های کامپوزیت الیافی همراه با لایه‌های فلزی ساخته می‌شوند. گلرها یکی از انواع کامپوزیت‌های FML هستند که متشکل از ورق‌های آلومینیومی همراه با کامپوزیت‌هایی با الیاف شیشه است. کامپوزیت‌های گلر دارای کاربردهای بسیاری در صنایع هوافضا هستند و از آن‌ها برای ساخت سازه‌هایی مانند بدنه هواپیمای ایرباس A380، بستر حمل بار بویینگ ۷۷۷، روکش موتور هواپیما و کانتینرهای حمل بار استفاده می‌شود.

در سال ۱۹۹۳، ولوت [۱] به انجام آزمایش‌های تجربی بر روی کامپوزیت‌های FML از نوع گلر و آرال برای توصیف ویژگی‌های این ساختارها در برابر ضربه سرعت پایین و سرعت بالا، در مقایسه با انواع دیگر ساختارهای مورد استفاده در صنایع هوافضا، نظیر ورق‌های آلومینیومی و کامپوزیت‌های با الیاف کربن پرداخت. این بررسی نشان داد که ورق‌های از نوع گلر ۳ در مقایسه با سایر مواد آزمایش شده، عملکرد بهتری در برابر ضربه از خود نشان می‌دهد. کولکارنی و همکاران [۲] یک مطالعه تجربی روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های متشکل از لایه‌های کامپوزیتی ترموپلاستیک الیاف بلند همراه با ورق‌های آلومینیومی انجام دادند. آزمایش ضربه سرعت پایین بر روی این ساختارها، در مطالعات آن‌ها، نشان از ایجاد خرابی به صورت جدایش لایه‌های کامپوزیت الیافی از لایه آلومینیومی، شکست الیاف و همچنین ایجاد شکست مود برشی در لایه آلومینیومی داشت. شبیه‌سازی عددی پاسخ به ضربه ورق‌های FML تشکیل شده از کامپوزیت‌های الیافی از جنس پلی‌پروپیلن با زمینه پلی‌پروپیلن (کامپوزیت خود تقویت شده) همراه با ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم، توسط گوان و همکاران [۳]، در نرم‌افزار تجاری المان محدود آباکوس، انجام شد. از دیگر کارهایی که به صورت تجربی به بررسی مکانیسم ایجاد آسیب در ورق‌های FML پرداخته است، می‌توان به لیو و لیاو [۴] اشاره کرد. در این تحقیق، آزمایش ضربه سرعت پایین با وزنه افتان انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که اولین آسیب ایجاد شده در این ساختارها، در اثر ضربه سرعت پایین، به صورت جدایش لایه آلومینیومی از لایه کامپوزیت الیافی،

در وجهی که بار ضربه‌ای به آن اعمال نشده، اتفاق می‌افتد. بررسی تجربی و عددی رفتار ورق‌های FML با لایه‌های کامپوزیتی الیافی از جنس کربن/اپوکسی، همراه با ورق‌های آلومینیومی (CARAL)، تحت ضربه سرعت پایین، توسط سونگ و همکاران [۵] انجام شد. حل عددی المان محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام و نمودار تغییرات نیروی ضربه بر حسب زمان با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. محققین به همخوانی مناسبی بین نتایج حل عددی و نتایج آزمایشگاهی اشاره کردند. راجکومار و همکاران [۶] به بررسی تجربی اثر اعمال بار ضربه سرعت پایین مکرر روی خواص مکانیکی و تغییرات این خواص در ورق‌های FML پرداختند. نمونه‌های FML مورد آزمایش، متشکل از سه لایه ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ همراه با دولایه ورق کامپوزیت الیافی با الیاف شیشه بود. نتایج نشان داد که مقدار خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده در آزمون کشش، پس از بار ضربه‌ای اول کاهش پیدا می‌کند؛ اما در دفعات بعدی اعمال بار، ثابت باقی می‌ماند. در واقع، این خواص مستقل از تعداد دفعات اعمال می‌شوند. بیناس و همکاران [۷] به بررسی آسیب ایجاد شده در ورق‌های FML با لایه‌های کامپوزیت الیافی، ساخته شده از الیاف کربن همراه با لایه آلومینیوم، تحت ضربه سرعت پایین پرداختند. بر اساس مشاهدات آن‌ها، اولین آسیب‌ها به صورت ترک‌هایی جزئی در ماتریس ظاهر شد؛ اما، آسیب اصلی ایجاد شده، ترک بین لایه‌های کامپوزیت با جهت‌گیری‌های مختلف و همچنین، جدایش لایه فلزی از لایه کامپوزیتی است. رفتار ورق FML با الیاف آرامید در رزین پلی‌پروپیلن، همراه با آلیاژ آلومینیوم 5052-H32 تحت ضربه سرعت پایین، توسط کاریو و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد، در ورق‌هایی که آرایش لایه‌های مختلف در آن به صورت سه‌لایه ورق آلومینیوم همراه با چهار لایه کامپوزیت الیافی بود، دارای بیشترین مقدار جذب انرژی مخصوص است. دورینگ و همکاران [۹] پاسخ ضربه سرعت پایین ورق‌های FML با کامپوزیت‌های الیافی هیبریدی متشکل از الیاف شیشه و کربن با آرایش زاویه‌دار را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این، آزمایش فشار بعد از ضربه نیز بر روی نمونه‌ها انجام شد؛ همچنین، علاوه بر نمونه‌های معمول FML، دو نمونه دیگر که علاوه بر لایه‌های فلزی، شامل لایه‌های الاستومر نیز هستند، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان

<sup>۱</sup> Fiber Metal Laminate

پارامترهای مختلف وجود دارد؛ بنابراین، برای نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بررسی تأثیر تعداد ضربات وزنه روی میزان تغییر شکل سازه و انرژی جذب‌شده اهداف گلر
- بررسی تأثیر درصد وزنی نانوذره در رزین روی تغییر شکل سازه و انرژی جذب‌شده اهداف گلر تحت ضربه مکرر

## ۲- آزمایش تجربی

در این مقاله رفتار کامپوزیت‌های FML حاوی نانوذره تحت ضربه سرعت‌پایین مکرر، به‌صورت تجربی و با سامانه سقوط وزنه موردبررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ورق‌های از نوع گلر، دارای رویه‌های آلومینیومی 2024-T3 و هسته کامپوزیت الیافی شیشه/اپوکسی در نظر گرفته شده است؛ همچنین، به‌منظور بهبود چسبندگی بین فاز تقویت‌کننده و رزین، نانو ذرات سیلیکا با درصد وزنی مختلف، به رزین اضافه شده است. درنهایت، نمونه‌های ساخته شده، با استفاده از دستگاه سقوط وزنه، تحت ضربه مکرر با ارتفاع و سطح انرژی ثابت قرار گرفتند. اثر پارامترهای درصد وزنی نانو ذرات و تعداد ضربات اعمال شده در مقاومت به ضربه و میزان جذب انرژی در اهداف گلر تحت ضربه مکرر موردبررسی قرار گرفتند.

## ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های FML، در این مقاله، از دولایه ورق آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 1 mm، و یک هسته لمینیت کامپوزیتی که توسط ورق‌های آلومینیومی ساندویچ می‌شود، تشکیل شده است. لمینیت کامپوزیتی از پنج لایه الیاف شیشه تک‌جهته نوع E با چگالی  $2.00 \text{ gr/cm}^2$  همراه با رزین اپوکسی با نام تجاری EPR 1080، محصول کشور فرانسه، ساخته شده است. بنابراین، آرایش قرارگرفته لایه‌های مختلف به‌صورت  $[Al/(Glass-epoxy)_5/Al]$  است؛ همچنین، به‌منظور بررسی اثر اضافه کردن نانو ذرات سیلیکا، در رفتار ورق FML تحت ضربه سرعت‌پایین مکرر، نانو سیلیکا نیز با خلوص 99.9٪ و به بزرگی ذرات 10 نانومتر در ماتریس زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نانوذره‌ها، در رزین اپوکسی، با درصد وزنی

داد که اضافه کردن یک لایه الاستومری در سطح زیرین نمونه، باعث کاهش ناحیه جدایش و افزایش مقاومت به ضربه شده است. منگ و همکاران [۱۰] رفتار ورق FML با چینش لایه‌های غیرمتمقارن را، تحت ضربه سرعت‌پایین، موردبررسی قرار دادند. برای این منظور، دو نوع لایه چینی مورد استفاده قرار گرفت. نوع اول نمونه‌ها دارای یک لایه ورق آلومینیوم همراه با لایه‌های کامپوزیت الیافی با آرایش متعامد پادمتمقارن بود (لایه‌های کامپوزیتی از الیاف کربن در رزین اپوکسی ساخته شده‌اند). نوع دوم نمونه‌ها نیز شامل دولایه آلومینیوم در دو طرف ورق، همراه با لایه‌های کامپوزیت الیافی با آرایش متعامد پادمتمقارن بود. شاه ویسی و فعلی [۱۱] به ارائه مدل تحلیلی برای بررسی رفتار یک تیر دارای انحنا، ساخته شده از دولایه ورق FML که هسته انعطاف‌پذیر را احاطه کرده‌اند، در برابر ضربه سرعت‌پایین، پرداختند. نتایج این مدل تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار آباکوس مقایسه شد. نتایج برای دو حالت شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده و گیردار موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تیر با تکیه‌گاه ساده، افزایش زاویه انحنا باعث کاهش در مقدار نیروی ضربه شده، اما، در تیر با تکیه‌گاه گیردار، عکس این روند اتفاق افتاد.

علیرغم تحقیقات زیاد انجام شده روی رفتار کامپوزیت‌های FML با ترکیب‌بندی‌های مختلف تحت بار ضربه‌ای، مطالعات بسیار کمی بر روی رفتار این ساختارها، تحت ضربه سرعت‌پایین مکرر با سامانه سقوط آزاد وزنه انجام شده و بیشتر تحقیقات روی ورق‌های فلزی تحت بار ضربه‌ای و انفجاری منفرد بوده است [۱۲-۴۳]. یکی از کاربردهای ضربات متوالی در صنایع نظامی است. یکی از دغدغه‌های امروز این صنعت، ارائه یک سازه کامپوزیتی سبک و مقاوم در برابر بارهای ضربه‌ای مکرر با توجه به حملات تروریستی حاضر است. به فرض مثال، در حملاتی که به خودروهای نظامی می‌شود، باید بدنه این سازه‌ها در برابر ضربات مکرر پرتابه‌های خارج شده از سلاح‌های نظامی مقاوم باشد تا به افراد داخل خودرو آسیب جدی وارد نشود؛ لذا بررسی پژوهش حاضر می‌تواند یکی از تحقیقات ابتدایی در مقاوم‌سازی یک سازه چه در بارگذاری سرعت‌پایین و چه تعمیر آن به استفاده در بارگذاری سرعت‌بالا باشد. بنابراین، نیاز به بررسی‌های بیشتری در این زمینه، برای بررسی اثر

انجام می‌شود. اچ کردن اغلب با استفاده از هیدروکسید سدیم صورت می‌گیرد. پس از آماده‌سازی رزین و اضافه کردن نانو ذرات، لایه گذاری الیاف انجام شد. برای این منظور، نمونه‌ها به صورت دستی به رزین آغشته شدند. مدت زمان لازم برای پخت کامل نمونه در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت بوده است. پس از تهیه کامپوزیت‌های با الیاف شیشه، ورق‌های آلیاژ آلومینیوم با ضخامت ۱mm در دو طرف کامپوزیت الیافی قرار گرفتند. برای این منظور، لایه داخلی فلز به چسب اپوکسی آغشته و کامپوزیت بین دو فلز آلومینیوم ساندویچ شد. پخت این مجموعه در دمای ۱۱۰°C، فشار ۵ bar و به مدت ۲۱۰ دقیقه انجام شد. در نهایت، نمونه‌های با ابعاد  $140 \times 140 \times 4/5$  mm<sup>3</sup> ساخته شد. نمونه‌ای از لایه کامپوزیتی ساخته‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

به دلیل ماهیت نرم فلزات و قابلیت جذب بالای انرژی در آن‌ها، بار ضربه‌ای، آسیب چندان جدی در این ساختارها وارد نمی‌کند. اما، در مقابل، به دلیل ماهیت ترد مواد کامپوزیتی، جذب انرژی در این مواد تنها در محدوده الاستیک اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، در برابر ضربه، آسیب‌پذیری بیشتری دارند. ورق‌های FML از مزایای فلزات همراه با کامپوزیت‌ها برای تقویت مقاومت آن‌ها به ضربه استفاده می‌کند. در اثر برخورد ضربه‌زننده، نیروهای غیرخطی عرضی به ورق وارد می‌شود. با توجه به این‌که در ورق‌های کامپوزیتی، اجزای تقویت‌کننده در راستای ضخامت وجود ندارد، در برابر ضربه عرضی بسیار آسیب‌پذیر هستند. از طرف دیگر، با توجه به تنش‌های بین‌لایه‌ای ایجاد شده در ساختار و مقاومت پایین اتصال بین لایه‌ها، جدایش بین‌لایه‌ای نیز، علاوه بر شکست ماتریس و خرابی تقویت‌کننده‌ها، در کامپوزیت اتفاق می‌افتد. شکل ۲ مودهای شکست ایجاد شده در کامپوزیت‌های FML را تحت اثر ضربه سرعت پایین، به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

## ۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش ضربه سرعت پایین بر روی نمونه‌های ساخته‌شده توسط دستگاه سقوط وزنه (شکل ۳) انجام شد. در حالت کلی، دستگاه سقوط وزنه از چند بخش اساسی تشکیل شده است: کنگی دستگاه (۲۷۵۰ گرم)، ضربه زننده (۳۰۰ گرم)، حس گر شتاب، میله‌های راهنما برای حرکت کنگی و فیکسچر

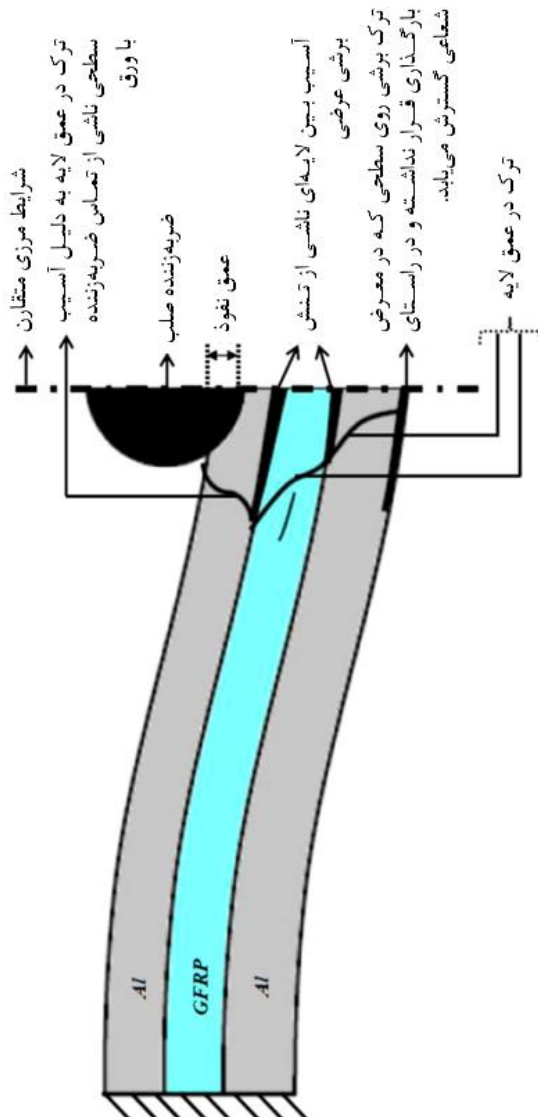
۰ تا ۴٪ اضافه شدند. در نهایت، پنج نوع نمونه با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ ساخته شد.

در این پژوهش، لمینیت کامپوزیتی به روش لایه گذاری دستی تهیه شد. برای این منظور ابتدا پارچه شیشه در ابعاد  $140 \times 140$  میلی‌متر مربع بریده شد. رزین اپوکسی حاوی نانو ذرات سیلیکا با درصدهای ۰ تا ۴٪ وزنی آماده شد. ابتدا نانو ذرات، به نسبت مشخص، به رزین اپوکسی اضافه و با استفاده از همزن مکانیکی توزیع شد (این ترکیب به مدت پنج دقیقه با دور ۱۸۰ rpm در همزن مکانیکی هم زده شد). سپس، به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت نانو ذرات سیلیکا در رزین اپوکسی و همچنین جلوگیری از کلوخه شدن نانو ذرات، محلول به مدت ۲۰ دقیقه در همزن مافوق صوت هم زده شد. در ادامه سخت‌کننده با نسبت ۱۵ به ۱۰۰ به رزین افزوده شد. همزن مافوق صوت، با ارسال امواج مافوق صوت موجب می‌شود که ترکیب خوشه‌ای نانو ساختارها به اجزای ریزتری شکسته شده و میزان نسبت سطح به حجم در ساختارهای نانو و میکرو افزایش یابد؛ در نتیجه باعث افزایش واکنش‌های شیمیایی خواهد شد. در ادامه، این محلول به مدت ۱۵ دقیقه در شرایط خلأ، به منظور خروج حباب‌ها از داخل آن، قرار داده شد.

اچ کردن بخشی از سطح آلومینیوم با استفاده از روش‌های شیمیایی است که از دلایل آن می‌توان به مات کردن مواد (کاهش انعکاس یا براقی)، برای حذف آلودگی از سطح برای پنهان کردن عیوب سطحی (خش، از بین بردن خطوط، و غیره) برای تولید یکنواخت نهایی نام برد. اچ شیمیایی، هم با استفاده از محلول‌های قلیایی و هم اسیدی

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها

شماره نمونه	لایه چینی	درصد نانو ذرات در نمونه	ضخامت نمونه (mm)
۱	[Al/(Glass-epoxy) <sub>s</sub> /Al]	۰	۴/۵
۲	[Al/(Glass-epoxy) <sub>s</sub> /Al]	۱	۴/۵
۳	[Al/(Glass-epoxy) <sub>s</sub> /Al]	۲	۴/۵
۴	[Al/(Glass-epoxy) <sub>s</sub> /Al]	۳	۴/۵
۵	[Al/(Glass-epoxy) <sub>s</sub> /Al]	۴	۴/۵



شکل ۲- مودهای خرابی ایجاد شده در کامپوزیت‌های FML

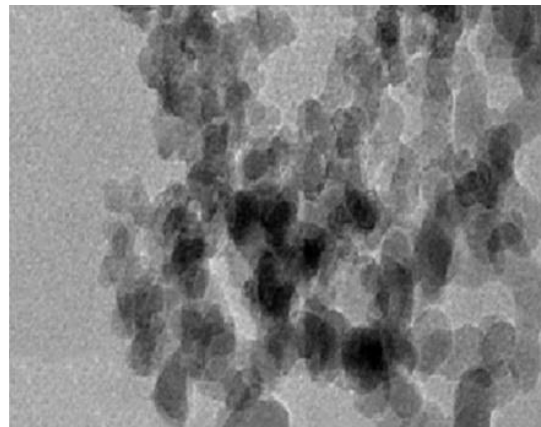
برای ضربه زننده ۳۰۰ گرمی انتخاب شد؛ همچنین، حس‌گر شتاب مورد استفاده در این آزمون، داده‌های مربوط به شتاب را هر ۱۰ میکروثانیه گزارش می‌کند. با استفاده از نمودار شتاب-زمان به دست آمده، مقادیر نیرو، سرعت ضربه زننده، جابه‌جایی یا تغییر شکل ورق و انرژی جذب شده، با استفاده از روابط (۱) تا (۴) محاسبه می‌شوند.

$$F = ma \quad (1)$$

$$v(t_i) = v_0 + gi\Delta t - \frac{1}{m_p} \left[ \sum_{n=0}^i F(n)\Delta t \right] \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمونه‌ای از لمینیت کامپوزیتی ساخته شده با تقویت‌کننده‌هایی از جنس شیشه و (ب) تصویر TEM برای نمونه ۱٪

برای نگهداری نمونه‌ها، کنگی دستگاه و ضربه زننده، وزن کلی مورد نیاز برای آزمایش را تأمین می‌کند. شکل ۳ این دستگاه راه به صورت شماتیک نشان می‌دهد. فیکسچر مورد استفاده در این دستگاه شامل دو صفحه‌ی مستطیلی فولادی با ابعاد  $140 \times 140 \text{ mm}^2$  و ضخامت ۲۰ میلی‌متر است. این فیکسچر در مرکز خود دارای سطح مواجهه مربعی  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  برای قرارگیری نمونه‌ها است. وزن مجموع ضربه زننده و کنگی به همراه حس‌گر و متعلقات آن، ۳/۰۵ کیلوگرم است. لازم به ذکر است که در این دستگاه، تغییر انرژی ضربه زننده به واسطه تغییر ارتفاع ضربه زننده صورت می‌گیرد. در این پژوهش، ارتفاع ۵ متر که متناظر با انرژی ۱۵۰ ژول هستند،

دماغه‌ی ضربه زنده در حین فرایند ضربه به آن وارد می‌کند) افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه نیرو برای حالت‌های نفوذ و سوراخ شدگی مشابه و یکسان است؛ همچنین، با افزایش انرژی ضربه، مدت‌زمان نمودار که نشان‌دهنده زمان تماس بین دماغه ضربه زنده و نمونه موردبررسی است، کاهش می‌یابد. در حالت بازگشت ضربه زنده، نیرو به صفر می‌رسد و شکل نمودار به صورت قله مانند خواهد بود. در حالت‌های نفوذ و سوراخ شدگی، نیرو در انتهای ناحیه نزولی صفر نمی‌شود و به یک مقدار ثابت در نزدیکی محور افقی خواهد رسید. این اتفاق ناشی از اصطکاک بین دماغه ضربه زنده و نمونه موردبررسی است.

در نمودارهای انرژی-زمان، با افزایش زمان تا یک مقدار مشخص، برای همه حالت‌ها، روند صعودی است. در ادامه، در حالت بازگشت ضربه زنده، بعد از یک مقدار بیشینه، به دلیل مصرف مقداری انرژی برای بازگشت و هل دادن پرتابه توسط نمونه در جهت مخالف حرکت، نمودار روند نزولی داشته و به یک مقدار ثابت می‌رسد. در حالت‌های نفوذ و سوراخ شدگی، مقدار انرژی به روند افزایش خود، به دلیل مصرف تمامی انرژی پرتابه برای انجام فرایند فرورفتگی و یا سوراخ شدگی، ادامه می‌دهد. نمونه‌ای از ساختارهای آزمایشی بعد از تغییر شکل در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳-۱- بررسی عملکرد ورق‌ها از نظر مقاومت به ضربه

همان‌طور که اشاره شد، جذب انرژی در ورق‌های FML به واسطه تغییر شکل ورق، جدایش ورق آلومینیومی از لایه کامپوزیت الیافی، جدایش لایه‌های کامپوزیت الیافی از یکدیگر، شکست الیاف و ماتریس و تغییر شکل‌های پلاستیک در ورق آلومینیومی صورت می‌گیرد.

شکل ۵، نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان را برای نمونه ۱ و در دفعات مختلف اعمال بار، نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است، مدت‌زمان ضربه اول ۵/۱۲ms است، درحالی‌که در ضربات بعدی، مدت‌زمان تماس ضربه زنده با نمونه کاهش پیدا می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد، اگرچه انرژی ضربه زنده در تمامی دفعات اعمال بار یکسان است، توزیع نیرو در ساختار در هر دفعه اعمال بار، تغییر می‌کند؛ همچنین، از این نمودار می‌توان متوجه شد که در ضربه اول، آسیب جزئی در ناحیه برخورد که می‌تواند جدایش ورق



شکل ۳- نمایشی از دستگاه سقوط وزنه

$$x(t_i) = v_0 i \Delta t + \frac{1}{2} g (i \Delta t)^2 - \frac{1}{m_p} \left[ \sum_{m=0}^i \left[ \sum_{n=0}^m F(n) \Delta t \right] \Delta t \right] \quad (3)$$

$$E(t_i) = \frac{1}{2} m_p (v_0)^2 - \frac{1}{2} m_p (v(t_i))^2 \quad (4)$$

در حالت کلی، برای صفحات تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین با انرژی‌های مختلف، امکان وقوع سه حالت مختلف وجود دارد: بازگشت ضربه زنده، نفوذ در قطعه و حالت سوراخ شدگی.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج بررسی‌های تجربی به صورت نمودارهای نیرو-زمان و انرژی-زمان برای نمونه‌های مختلف، به ازای انرژی ۱۵۰ ژول ارائه می‌شود. سپس عملکرد نمونه‌ها در برابر ضربه سرعت پایین مکرر، از نظر بیشینه نیرو، مقدار جذب انرژی و تغییر شکل ایجاد شده در آن‌ها موردبررسی قرار می‌گیرند.

در حالت کلی، در نمودارهای نیرو-زمان، با افزایش انرژی ضربه، حداکثر نیروی تماسی (نیروی که نمونه در مواجهه با



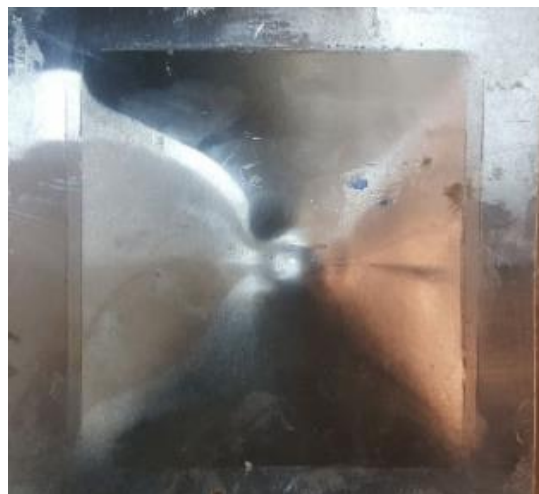
(ت) شکست الیاف و ماتریس

شکل ۴- نمونه آزمایشی بعد از تغییر شکل: الف) نمونه ۳٪ در ضربه سوم، ب) نمونه ۱٪ در ضربه چهارم، پ) نمونه ۰٪ در ضربه پنجم و ت) شکست الیاف و ماتریس

آلومینیومی از لایه‌های کامپوزیت الیافی و یا جدایش در بین لایه‌های کامپوزیت الیافی باشد، اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که در این نمونه، در ضربه پنجم، سوراخ شدگی



(الف) پارگی



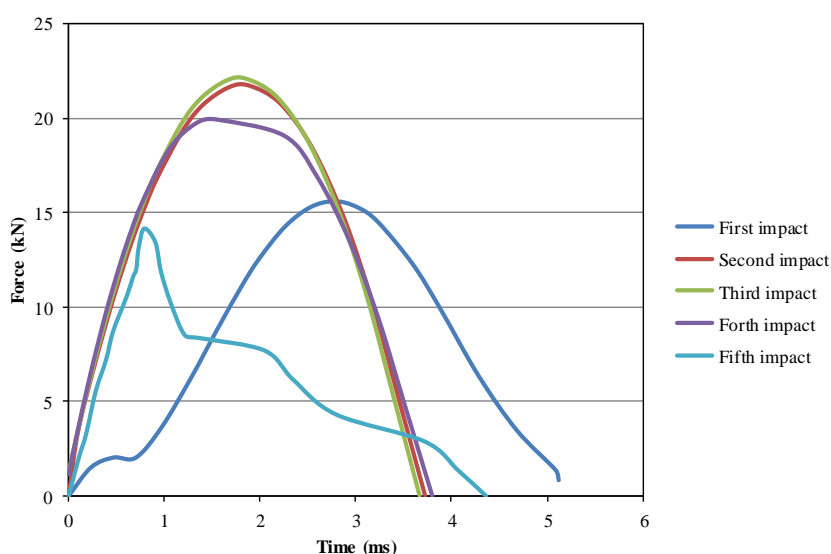
(ب) تغییر شکل پلاستیک



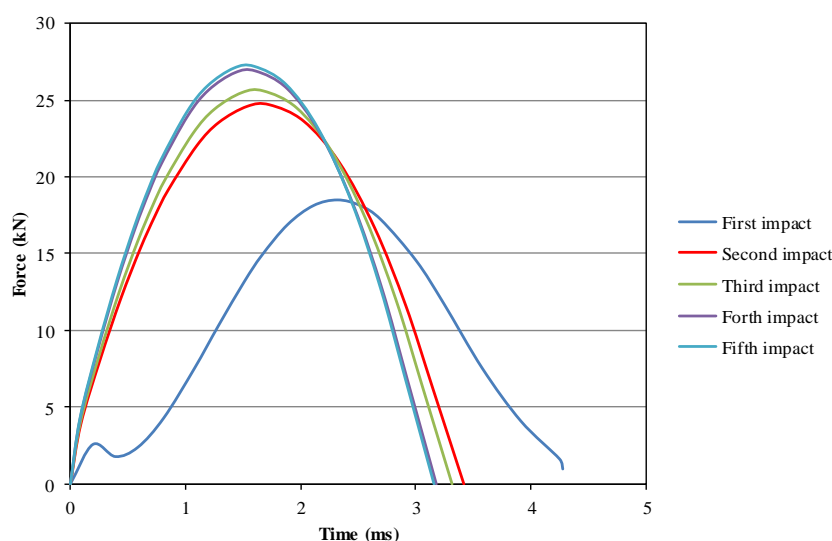
(پ) سوراخ شدگی

شکل ۶ نمودار نیرو-زمان را برای نمونه ۲ که شامل ۱٪ نانوذره است، نشان می‌دهد. روند کلی این نمودار نیز مشابه حالت قبل است، بدین معنی که اگرچه انرژی ضربه زننده در تمامی دفعات اعمال بار یکسان است، توزیع نیرو در ساختار در هر دفعات مختلف اعمال بار، متغیر است. مشابه حالت قبل، این نمودار نیز ایجاد آسیب جزئی در ناحیه برخورد را در ضربه اول نشان می‌دهد؛ همچنین نمودارها نشان می‌دهند که در این نمونه، سوراخ شدگی در ورق، پس از پنج مرتبه اعمال بار، اتفاق نیفتاد. در ضربه اول، حداکثر

اتفاق افتاد که در نمودارهای نیرو-زمان نیز مشهود است. در ضربه اول، حداکثر نیروی واردشده برابر ۱۵/۶ kN و در فاصله زمانی ۲/۵ ms تا ۳/۵ ms بر ورق واردشده است. در ضربه دوم و سوم، حداکثر نیرو، به ترتیب، به مقدار ۲۱/۷۳ kN و ۲۲/۰۹ kN، در فاصله زمانی ۱/۵ ms تا ۲ ms، رسید. پس‌از آن، در ضربه چهارم، آسیب ایجادشده در ساختار گسترش‌یافته و مقدار حداکثر نیرو به ۱۹/۹۳ kN کاهش پیدا می‌کند. پس از ضربه چهارم نیز، سوراخ شدگی در ساختار ایجاد می‌شود.



شکل ۵- نمودار نیرو-زمان برای نمونه ۱



شکل ۶- نمودار نیرو-زمان برای نمونه ۲

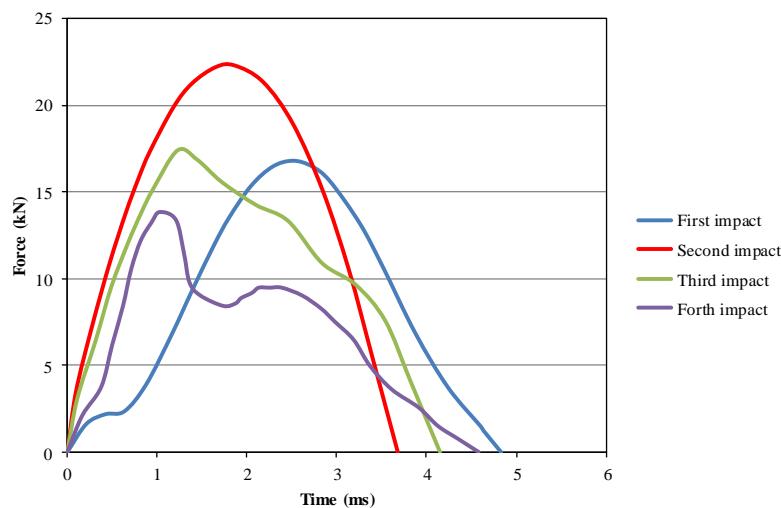


سوم رفتاری کاملا متفاوت نشان می‌دهد و این بدان علت است که به نهایت حد شکلدهی خود نزدیک شده و نهایتا در ضربه چهارم، سوراخ شدگی در نمونه اتفاق می‌افتد. این موضع به وضوح در نمودارهای نیرو-زمان مشهود است. در ضربه اول، حداکثر نیروی واردشده برابر  $16/8 \text{ kN}$  و در فاصله زمانی  $2 \text{ ms}$  تا  $3 \text{ ms}$  بر ورق وارد شد. در ضربه دوم، حداکثر نیرو، به مقدار  $22/3 \text{ kN}$  در لحظه  $2 \text{ ms}$  رسید. در ضربه سوم نیز، حداکثر نیرو، به مقدار  $17/45 \text{ kN}$  در بازه زمانی  $1 \text{ ms}$  تا  $1/5 \text{ ms}$  رسید.

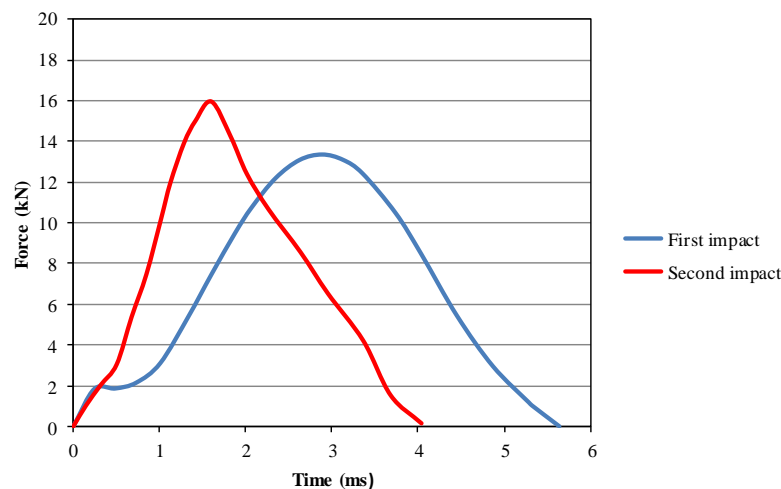
نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان در نمونه‌های ۴ و ۵ نیز، به ترتیب، در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است.

نیروی واردشده برابر  $18/51 \text{ kN}$  و در فاصله زمانی  $2 \text{ ms}$  تا  $3 \text{ ms}$  بر ورق واردشده است. در ضربه‌های دوم، سوم، چهارم و پنجم نیز، حداکثر نیرو، به ترتیب، به مقدار  $24/7 \text{ kN}$ ،  $25/6 \text{ kN}$ ،  $26/9 \text{ kN}$  و  $27/2 \text{ kN}$  در فاصله زمانی  $1/5 \text{ ms}$  تا  $2 \text{ ms}$  رسید.

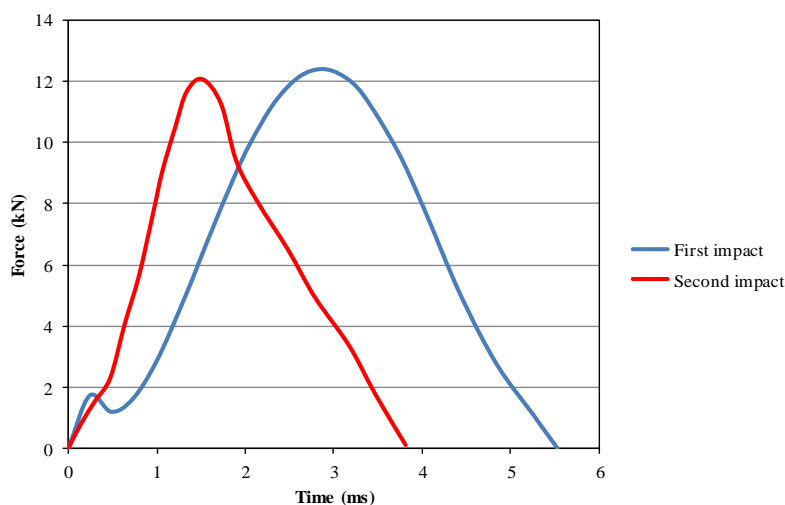
نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان در نمونه ۳ با  $2/2$  نانوذره، در شکل ۷ نشان داده شده است. در این حالت نیز، روند تغییرات نیرو در ضربه اول و دوم، مشابه دو حالت قبل برای نمونه‌های  $0/0$  و  $1/1$  است و این بدین علت است که در تمامی این حالت‌ها ورق دچار تغییرشکل پلاستیک شده و هیچ آثار تخریبی در نمونه وجود ندارد. اما این سازه در ضربه



شکل ۷- نمودار نیرو-زمان برای نمونه ۳



شکل ۸- نمودار نیرو-زمان برای نمونه ۴



شکل ۹- نمودار نیرو-زمان برای نمونه ۵

هستند، به ترتیب، در ضربات چهارم، دوم و دوم، سوراخ شدگی در آن‌ها اتفاق افتاد. اما برای نمونه ۲ که حاوی ۱٪ نانو ذرات است، تا ضربه پنجم، آسیب کامل در ساختار ایجاد نشد؛ بنابراین، از نظر آسیب کلی وارد شده به ساختار، می‌توان عملکرد نمونه ۲ را بهتر از بقیه نمونه‌ها در نظر گرفت که این به سبب افزایش مقاومت ساختار در برابر بار ضربه‌ای است. در مقایسه با نمونه ۱، اضافه کردن نانو ذرات به اندازه ۱٪، موجب بهبود عملکرد آن، از نظر مقاومت در برابر آسیب ایجاد شده در ورق شده است، اما، افزایش بیشتر مقدار نانو ذرات، اثر معکوس در روند خرابی در ساختار داشته است.

از نظر مقاومت به ضربه نیز، نمونه ۲ عملکرد بهتری در مقایسه با بقیه نمونه‌ها داشته است. در ضربه اول، مقدار بیشینه نیرویی که ورق تحمل می‌کند، در نمونه ۲، به اندازه ۱۵/۶۷٪ بزرگ‌تر از نمونه ۱، ۹/۱۸٪ بیشتر از نمونه ۳، ۲۷٪ بیشتر از نمونه ۴ و ۳۳٪ بیشتر از نمونه ۵ است. در ضربه دوم نیز، مقدار بیشینه نیرو در نمونه ۲ به اندازه ۱۲٪ بزرگ‌تر از نمونه ۱، ۹/۷٪ بزرگ‌تر از نمونه ۳، ۳۵/۴۲٪ بزرگ‌تر از نمونه ۴ و ۵۱٪ بزرگ‌تر از نمونه ۵ است. همان‌طور که اشاره شد، نمونه‌های ۴ و ۵ در ضربه دوم دچار آسیب شدند. مقایسه بین نیروها در ضربه سوم نشان می‌دهد که بیشینه نیرو در نمونه ۲، در مقایسه با نمونه‌های ۱ و ۳، به ترتیب به اندازه ۱۳/۷٪ و ۳۲٪ بزرگ‌تر است. به همین ترتیب، در ضربه چهارم نیز، مقدار بیشینه نیرو در نمونه ۲ به اندازه ۲۵/۹٪ بزرگ‌تر از نمونه ۱ است (نمونه ۳ در ضربه چهارم دچار سوراخ شدگی شد).

رفتار این دو نمونه دارای مشابهت‌های بسیاری است. مشابهت‌های قبل، در این حالت‌ها نیز، در ضربه اول، آسیب اولیه در ساختار ایجاد می‌شود؛ همچنین، در این دو نمونه، در ضربه دوم، سوراخ شدگی اتفاق افتاد. در ضربه اول، حداکثر نیروی وارد شده در نمونه ۴ برابر ۱۳/۳۵ kN و در نمونه ۵، برابر ۱۲/۳۸ kN، در زمان ۳ ms بر ورق وارد شد. در ضربه دوم نیز حداکثر نیرو در نمونه ۴ به مقدار ۱۵/۹ kN و در نمونه ۵ به مقدار ۱۲/۱ kN، در بازه زمانی ۱ ms تا ۲ ms رسید. لازم به ذکر است که در هر مرحله از اعمال بار ضربه، تا قبل از ایجاد خرابی کامل در نمونه‌ها، بازه زمانی کوتاه‌تر و قله نمودار تیزتر می‌شود. دلیل این امر، افزایش سطح تماس بین ضربه زننده و نمونه، با افزایش تعداد دفعات اعمال بار و ایجاد حالت فرورفتگی بیشتر در نمونه‌ها است.

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده و مقادیر بیشینه نیروی محاسبه شده برای هر ورق را نشان می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده مقاومت به ضربه ورق‌های FML محتوی نانو ذرات سیلیکا با درصدهای وزنی مختلف است. با مقایسه مقادیر ارائه شده در این جدول، می‌توان تأثیر اضافه کردن نانو ذرات در مقاومت به ضربه ورق‌های FML، تحت بار ضربه سرعت پایین مکرر، مورد بررسی قرار داد.

همان‌طور که اشاره شد، نمونه ۱ که رزین مورد استفاده در آن فاقد نانو ذرات سیلیکا است، در ضربه پنجم، سوراخ شدگی در ساختار ایجاد شد؛ همچنین، نمونه‌های ۳، ۴ و ۵ نیز، که به ترتیب حاوی ۲٪، ۳٪ و ۴٪ نانو ذرات سیلیکا

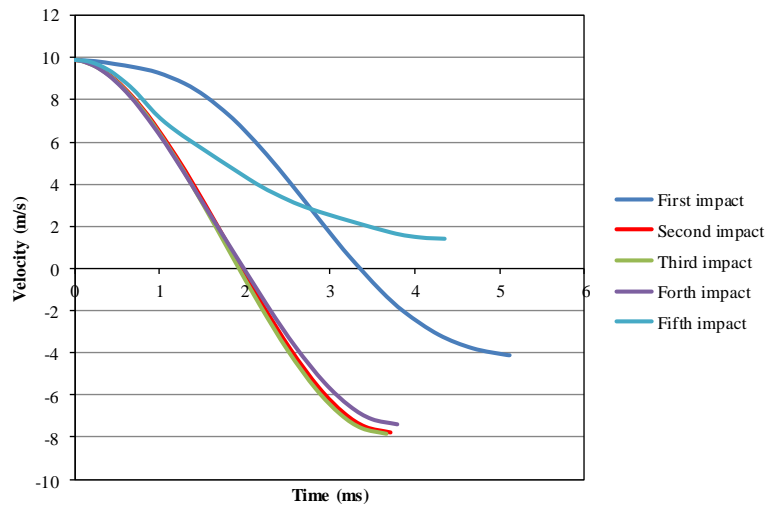
جدول ۲- نتایج آزمایش برای مقاومت به ضربه در هر بار اعمال ضربه

شماره نمونه	تعداد دفعات اعمال بار	درصد نانو ذره	شماره ضربه	انرژی ضربه زننده (J)	سرعت ضربه زننده (m/s)	حداکثر نیرو (kN)
			۱	۱۵۰	۹/۹	۱۵/۶
			۲	۱۵۰	۹/۹	۲۱/۷۳
۱	۵	%۰	۳	۱۵۰	۹/۹	۲۲/۰۹
			۴	۱۵۰	۹/۹	۱۹/۹۳
			۵	۱۵۰	۹/۹	سوراخ شدگی
			۱	۱۵۰	۹/۹	۱۸/۵۱
			۲	۱۵۰	۹/۹	۲۴/۷
۲	۵	%۱	۳	۱۵۰	۹/۹	۲۵/۶
			۴	۱۵۰	۹/۹	۲۶/۹
			۵	۱۵۰	۹/۹	۲۷/۲
			۱	۱۵۰	۹/۹	۱۶/۸
			۲	۱۵۰	۹/۹	۲۲/۳
۳	۴	%۲	۳	۱۵۰	۹/۹	۱۷/۴
			۴	۱۵۰	۹/۹	سوراخ شدگی
			۱	۱۵۰	۹/۹	۱۳/۳۵
			۲	۱۵۰	۹/۹	۱۵/۹
۴	۳	%۳	۳	۱۵۰	۹/۹	پارگی
			۱	۱۵۰	۹/۹	۱۲/۴
			۲	۱۵۰	۹/۹	۱۲/۱
۵	۳	%۴	۳	۱۵۰	۹/۹	پارگی

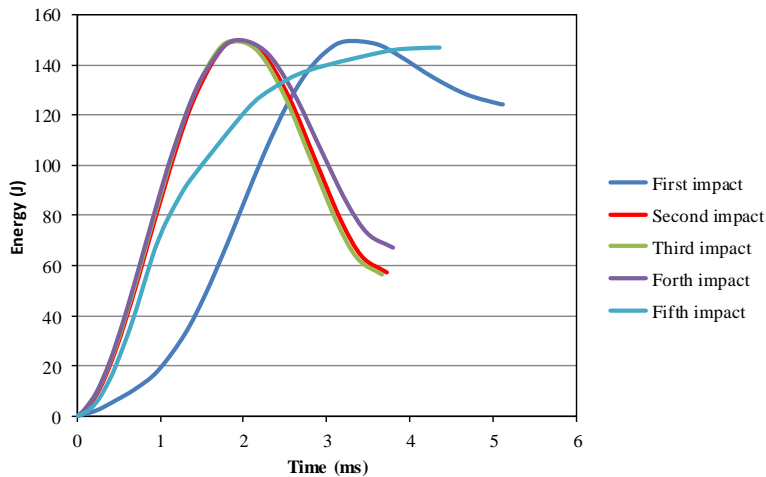
## ۳-۲- بررسی عملکرد ورق‌ها از نظر جذب انرژی

پارامتر دیگری که برای ارزیابی عملکرد ورق‌ها تحت بارهای ضربه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد، مقدار انرژی جذب شده از ضربه زننده، توسط ورق است. در ادامه این بخش، تغییرات انرژی جذب شده توسط ورق، در مدت زمان برخورد ضربه زننده، در هر یک از دفعات اعمال بار، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات سرعت ضربه زننده با زمان را برای نمونه ۱ نشان می‌دهد. این نمودار نیز، اطلاعات مفیدی در رابطه به رفتار ساختار ارائه می‌دهد. این نمودار نیز نشان‌دهنده حالت بازگشت ضربه زننده برای ضربه‌های ۱ تا ۴، و سوراخ شدگی در ضربه پنجم است. شکل ۱۱ نیز نمودار تغییرات انرژی جذب شده را برحسب زمان نشان می‌دهد. مقدار انرژی جذب شده در ضربه اول برابر  $J 124/4$ ، در ضربه



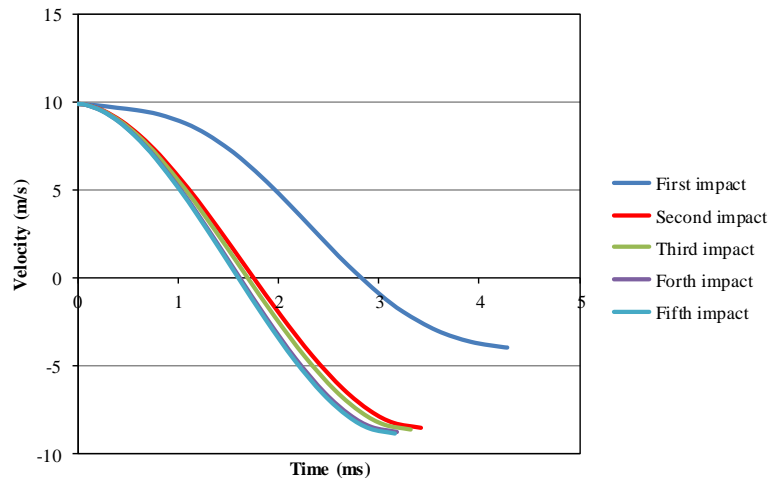
شکل ۱۰- تغییرات سرعت ضربه‌زنده با زمان برای نمونه ۱



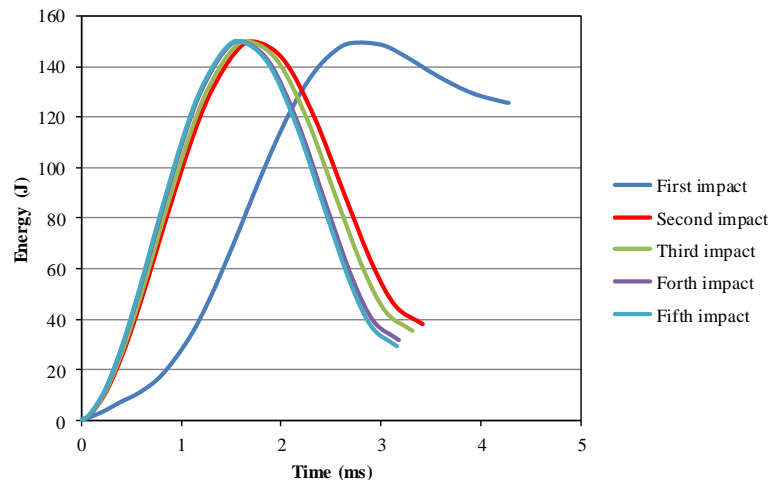
شکل ۱۱- تغییرات انرژی برحسب زمان برای نمونه ۱

با  $J 29/33$  است. شکل ۱۴ نمودار تغییرات سرعت ضربه زنده با زمان را برای نمونه ۳ نشان می‌دهد. این نمودار نیز نشان‌دهنده حالت بازگشت ضربه زنده برای ضربه‌های ۱ تا ۳، و نفوذ کامل و تا حدودی سوراخ شدگی در ضربه چهارم است. شکل ۱۵ نمودار انرژی جذب‌شده-زمان را نشان می‌دهد. مقدار انرژی جذب‌شده در ضربه اول برابر  $J 127/9$ ، در ضربه دوم برابر  $J 51/4$ ، در ضربه سوم برابر  $J 113/26$  و در نهایت، در ضربه چهارم، به دلیل نفوذ کامل ضربه زنده و توقف در داخل نمونه، برابر با  $J 150$  است (تمام انرژی ضربه زنده گرفته‌شده است). شکل ۱۶ نمودار سرعت-زمان را برای نمونه ۴ نشان می‌دهد. این نمودار نیز نشان‌دهنده حالت

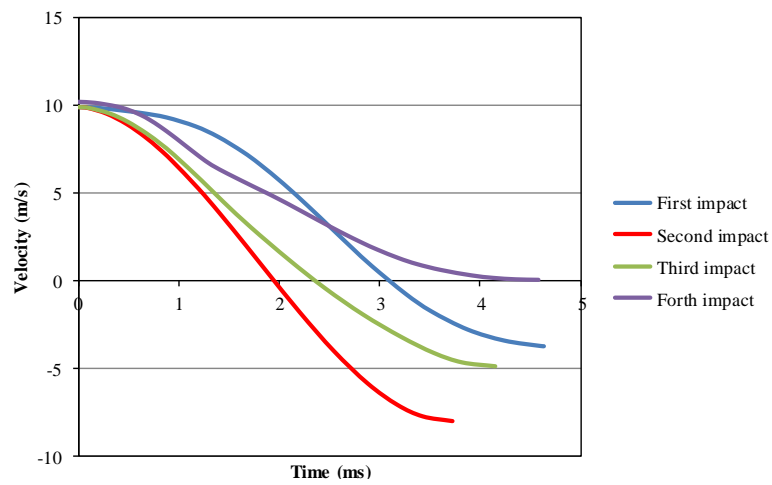
دوم برابر  $J 57/3$ ، در ضربه سوم برابر  $J 56/44$ ، در ضربه چهارم برابر با  $J 67/2$  و در نهایت، در ضربه پنجم که سوراخ شدگی اتفاق افتاده، نمودار روند کاملاً صعودی داشته و مقدار جذب انرژی برابر با  $J 147$  است. شکل ۱۲ نیز، نمودار سرعت-زمان ضربه زنده را برای نمونه ۲ نشان می‌دهد. این نمودار نیز نشان‌دهنده حالت بازگشت ضربه زنده برای ضربه‌های ۱ تا ۵ است. شکل ۱۳ نیز نمودار تغییرات انرژی جذب‌شده را برحسب زمان نشان می‌دهد. مقدار انرژی جذب‌شده در ضربه اول برابر  $J 125/7$ ، در ضربه دوم برابر  $J 38/04$ ، در ضربه سوم برابر  $J 35/44$ ، در ضربه چهارم برابر با  $J 31/75$  و در نهایت، در ضربه پنجم مقدار جذب انرژی برابر



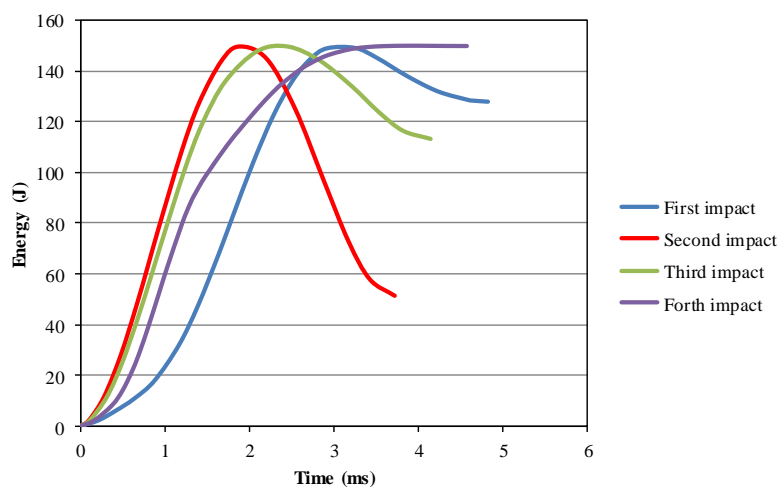
شکل ۱۲- تغییرات سرعت ضربه‌زننده با زمان برای نمونه ۲



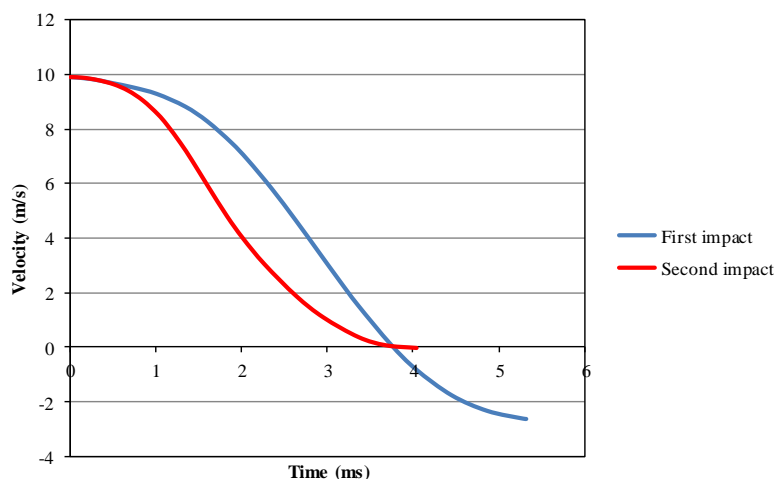
شکل ۱۳- تغییرات انرژی بر حسب زمان برای نمونه ۲



شکل ۱۴- تغییرات سرعت ضربه‌زننده با زمان برای نمونه ۳



شکل ۱۵- تغییرات انرژی برحسب زمان برای نمونه ۳

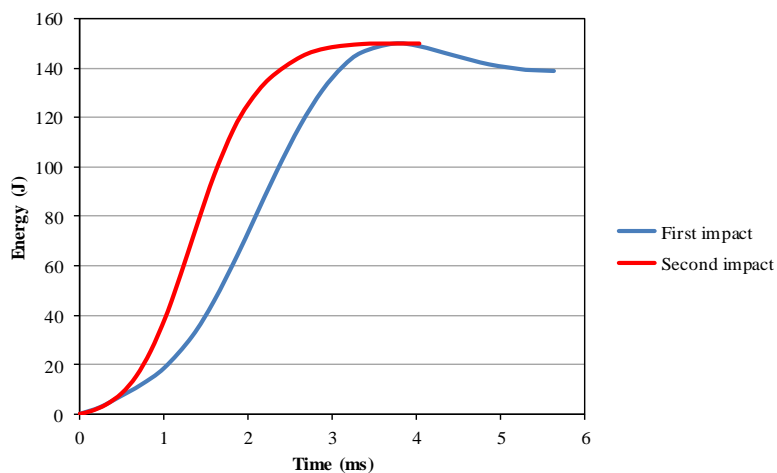


شکل ۱۶- تغییرات سرعت ضربه‌زنده بازمان برای نمونه ۴

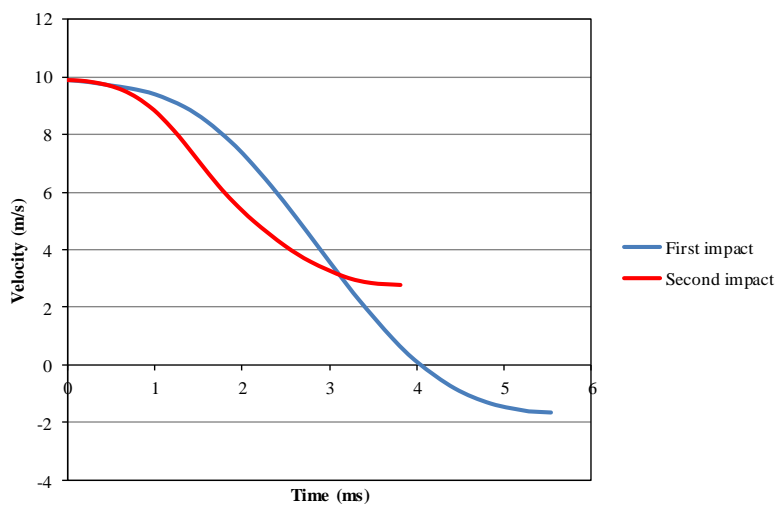
نتایج نشان می‌دهد که برای اولین ضربه، با افزایش درصد نانو ذره از ۱ به ۴ درصد، جذب انرژی در نمونه مربوطه به میزان ۰/۱٪، ۰/۳٪، ۰/۱۲٪ و ۰/۱۶٪ در مقایسه با نمونه ۰٪ افزایش پیدا می‌کند که این بدلیل تغییر شکل قابل توجه ساختار با محتوی نانوذره بیشتر و کاهش مقاومت ضربه‌ای آن است. همچنین برای ضربات بعدی، با افزایش درصد نانو ذره از صفر به ۰/۱٪، میزان جذب انرژی در نمونه به دلیل کاهش میزان تغییر شکل کاهش می‌یابد و عملکرد بسیار بهتری نسبت به بقیه ساختارهای در برابر بار ضربه‌ای مکرر دارد.

در حالت کلی، نمودارهای سرعت-زمان نشان داد که در حالت بازگشت ضربه‌زنده، بعد از اولین برخورد و تماس پرتابه،

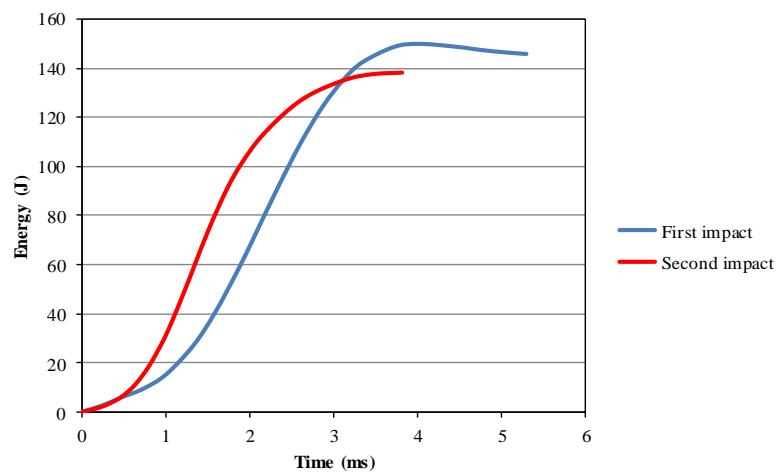
بازگشت ضربه زنده در ضربه ۱، و نفوذ کامل در ضربه دوم است. شکل ۱۷ نیز، نمودار انرژی جذب‌شده در ورق را برحسب زمان نشان می‌دهد. مقدار انرژی جذب‌شده در ضربه اول برابر ۱۳۸/۹ J و در ضربه دوم برابر ۱۵۰ J است. رفتار نمونه ۵ شباهت بسیاری با رفتار نمونه ۴ دارد. شکل ۱۸ نمودار سرعت-زمان را برای این نمونه نشان می‌دهد. مشابه نمونه ۴، در این نمونه نیز حالت بازگشت اندک ضربه زنده در ضربه ۱، و سوراخ شدگی در ضربه دوم مشاهده شد. شکل ۱۹ نیز، نمودار انرژی جذب‌شده در ورق را برحسب زمان نشان می‌دهد. مقدار انرژی جذب‌شده در ضربه اول برابر ۱۴۵/۷ J و در ضربه دوم برابر ۱۳۸/۳ J است. در حالت کلی،



شکل ۱۷- تغییرات انرژی برحسب زمان برای نمونه ۴



شکل ۱۸- تغییرات سرعت ضربه‌زننده بازمان برای نمونه ۵



شکل ۱۹- تغییرات انرژی برحسب زمان برای نمونه ۵

نمودار انرژی-زمان، لازم به توضیح است که روند این نمودار، با افزایش زمان تا یک مقدار مشخص، برای همه حالت‌ها، صعودی است. در ادامه، در حالت بازگشت ضربه‌زنده، بعد از یک مقدار بیشینه، به دلیل مصرف مقداری انرژی برای بازگشت و هل دادن پرتابه توسط نمونه در جهت مخالف حرکت، نمودار روند نزولی داشته و به یک مقدار ثابت می‌رسد. در حالت‌های نفوذ و سوراخ‌شدگی، مقدار انرژی به روند افزایش خود، به دلیل مصرف تمامی انرژی پرتابه برای انجام فرایند فرورفتگی و یا سوراخ‌شدگی، ادامه می‌دهد. نتایج مربوط به جذب انرژی نیز، به صورت خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این جدول نشان

سرعت کاهش پیدا کرده، و در نهایت، به دلیل بازگشت پرتابه به سمت بالا، دارای مقدار منفی می‌شود. بازگشت پرتابه به سمت بالا، بعد از اینکه بیشینه جابجایی در نمونه رخ داد، اتفاق می‌افتد. در حالت نفوذ، این مقدار منفی بسیار ناچیز، و دلیل آن، بازگشت جزئی پرتابه، قبل از گیرکردن در نمونه است. در حالت سوراخ‌شدگی، به دلیل رد شدن ضربه‌زنده از نمونه، سرعت به مقدار صفر نخواهد رسید، بلکه، بعد از رسیدن به یک نقطه مشخص به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند. لحظه شروع قسمت خطی نمودار، نقطه آغاز سوراخ‌شدگی است. انرژی جذب شده برای حالت سوراخ‌شدگی، تا شروع قسمت خطی در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین در مورد

جدول ۳- نتایج آزمایش برای جذب انرژی در ورق در هر بار اعمال ضربه

شماره نمونه	تعداد دفعات اعمال بار	شماره ضربه	انرژی ضربه زنده (J)	سرعت ضربه زنده (m/s)	انرژی جذب شده (J)	انرژی باقی مانده (J)
		۱	۱۵۰	۹/۹	۱۲۴/۳	۲۵/۷
		۲	۱۵۰	۹/۹	۵۷/۳	۹۲/۷
۱	۵	۳	۱۵۰	۹/۹	۵۶/۴۴	۹۳/۵۶
		۴	۱۵۰	۹/۹	۶۷/۲	۸۲/۸
		۵	۱۵۰	۹/۹	۱۴۷	۳
		۱	۱۵۰	۹/۹	۱۲۵/۷	۲۴/۳
		۲	۱۵۰	۹/۹	۳۸/۰۴	۱۱۱/۹۶
۲	۵	۳	۱۵۰	۹/۹	۳۵/۴۴	۱۱۴/۵۶
		۴	۱۵۰	۹/۹	۳۱/۷۵	۱۱۸/۲۵
		۵	۱۵۰	۹/۹	۲۹/۳۳	۱۲۰/۶۷
		۱	۱۵۰	۹/۹	۱۲۷/۹	۲۲/۱
		۲	۱۵۰	۹/۹	۵۱/۴	۹۸/۶
۳	۴	۳	۱۵۰	۹/۹	۱۱۳/۲۶	۳۶/۷۴
		۴	۱۵۰	۹/۹	۱۵۰	۰
		۱	۱۵۰	۹/۹	۱۳۸/۹	۱۱/۱
		۲	۱۵۰	۹/۹	۱۵۰	۰
		۱	۱۵۰	۹/۹	۱۴۵/۷	۴/۳
۵	۳	۲	۱۵۰	۹/۹	۱۳۸/۳	۱۱/۷



اتفاق افتاده است، به طوری که سفتی ورق به شکل محسوسی کاهش پیدا کرده است؛ همچنین این نمودار نشان از عملکرد بهتر نمونه ۲ در برابر تغییر شکل، نسبت به نمونه‌های دیگر دارد. از نظر مقایسه کمی، تغییر شکل ایجاد شده در نمونه ۲ به مقدار ۱۸/۱۲٪ کم‌تر از نمونه ۱، ۶/۷٪ کم‌تر از نمونه ۳، ۳۹/۶٪ کم‌تر از نمونه ۴ و ۵۶/۴٪ کم‌تر از نمونه ۵ است. به همین ترتیب، در ضربه دوم نیز، تغییر شکل ورق در نمونه ۲ به مقدار ۲۵/۴۵٪ کم‌تر از نمونه ۱ و ۶/۸۳٪ کم‌تر از نمونه ۳ است. در ضربه سوم نیز، این بهبود عملکرد به میزان ۳۲/۴٪ و ۴۸٪ است. در ضربه چهارم نیز، که نمونه ۳ دچار سوراخ شدگی شده است، تغییر شکل ورق در نمونه ۲ به مقدار ۴۲/۱٪ کم‌تر از نمونه ۱ است.

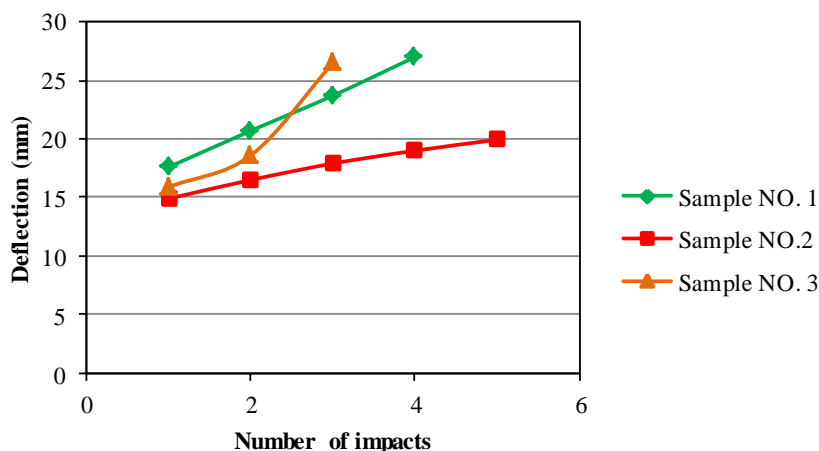
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نتایج آزمایش‌های تجربی برای ورق‌های FML تحت بار ضربه سرعت‌پایین مکرر، ارائه، و عملکرد آن‌ها از نظر مقاومت به ضربه، میزان جذب انرژی و مقدار تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه ۲ که دارای ۱٪ وزنی از نانو ذرات سیلیکا در ساختار خود است، از نظر بیشینه نیرو و مقدار تغییر شکل‌ها و آسیب‌های ایجاد شده، عملکرد بهتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر دارد. سایر نتایج به صورت زیر جمع‌بندی می‌گردد:

می‌دهد که، در ضربه اول، نمونه‌های ۴ و ۵، به دلیل تغییر شکل‌های زیاد و آسیب‌های گسترده‌ای که در آن‌ها اتفاق افتاده است، بیشترین جذب انرژی را داشته‌اند؛ همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در همه نمونه‌ها، بیشترین جذب انرژی تا قبل از ایجاد خرابی کامل، در ضربه اول است. این نتیجه نشان می‌دهد که عمده آسیب ایجاد شده در ورق، در ضربه اول به وجود می‌آید که شامل تغییر شکل‌های پلاستیک در رویه آلومینیومی و شکست الیاف در کامپوزیت الیافی است.

#### ۳-۳ بررسی عملکرد ورق‌ها از نظر تغییر شکل‌ها

از دیگر پارامترهایی که برای بررسی عملکرد ورق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، تغییر شکل‌های ایجاد شده در آن‌ها، به‌عنوان مهم‌ترین مکانیسم جذب انرژی در این ساختارها، است. شکل ۲۰ تغییر شکل‌های ایجاد شده در مرکز ورق را در نمونه‌های ۱، ۲ و ۳، برحسب شماره ضربات اعمال شده (تا قبل از ایجاد سوراخ شدگی در آنها) نشان می‌دهد. تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه‌های ۴ و ۵، به دلیل ایجاد سوراخ شدگی در ضربه دوم، در این نمودار آورده نشده است. لازم به ذکر است که مقدار تغییر شکل مرکز ورق برای نمونه ۴، در ضربه اول برابر ۲۰/۸ mm و در نمونه ۵، برابر ۲۳/۳ mm است. افزایش تغییر شکل‌ها در ورق، با افزایش تعداد بارهای اعمال شده، امری طبیعی است. این نمودار نشان می‌دهد، در نمونه ۳، پس از ضربه دوم، آسیب‌های بسیاری به صورت شکسته شدن الیاف و جدایش



شکل ۲۰- تغییر شکل مرکز ورق برحسب شماره ضربه برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳

### ۵- مراجع

- (۱) از نظر مقاومت به ضربه، نمونه ۲ در مقایسه با نمونه‌های دیگر، عملکرد بهتری از خود نشان داد، به طوری که، از نظر بیشینه نیرو در ضربه اول، به اندازه ۱۵/۶۷٪ بزرگ‌تر از نمونه ۱، ۹/۱۸٪ بیشتر از نمونه ۳، ۲۷٪ بیشتر از نمونه ۴ و ۳۳٪ بیشتر از نمونه ۵ است. روندی مشابه برای بیشینه نیرو در ضربات بعدی نیز مشاهده شد.
- (۲) از نظر آسیب ایجادشده، نمونه ۲ بعد از ۵ مرتبه اعمال بار، آسیب جدی در آن مشاهده نشد و کاهش سفتی زیادی در آن به وجود نیامد. نمونه ۱ در ضربه پنجم دچار سوراخ شدگی شد. نمونه ۳ در ضربه چهارم و در نمونه‌های ۴ و ۵، سوراخ شدگی در ضربه دوم به وجود آمد.
- (۳) در همه نمونه‌ها، در ضربه اول، آسیب‌های اولیه که شامل تغییر شکل‌های پلاستیک در رویه‌های آلومینیومی و شکست جزئی در الیاف بود، مشاهده شد.
- (۴) با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های مرکز ورق بعد از هر مرتبه اعمال بار، مشاهده شد که در نمونه ۳، پس از ضربه دوم، سفتی ورق به شکل محسوسی کاهش پیدا کرده است که نشان از آسیب‌های جدی واردشده به آن پس از ضربه دوم است.
- (۵) از نظر مقدار تغییر شکل‌های ایجادشده در ورق، نمونه ۲ عملکرد بهتری از خود نشان داد؛ به طوری که، در ضربه اول، تغییر شکل ایجاد شده در نمونه ۲ به مقدار ۱۸/۱۲٪ کم‌تر از نمونه ۱، ۶/۷٪ کم‌تر از نمونه ۳، ۳۹/۶٪ کم‌تر از نمونه ۴ و ۵۶/۴٪ کم‌تر از نمونه ۵ است. مشابه این روند در مقدار تغییر شکل ورق بعد از ضربه اول نیز در نمونه‌ها مشاهده شد.
- (۶) از نظر جذب انرژی، نمونه‌های ۴ و ۵، به دلیل تغییر شکل بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها و آسیب‌های گسترده‌ای که در آنها اتفاق افتاده است، بیشترین جذب انرژی را داشته‌اند.
- در همه نمونه‌ها، بیشترین جذب انرژی تا قبل از ایجاد خرابی کامل، در ضربه اول اتفاق می‌افتد.
- [1] Vlot A (1993) Impact properties of fibre metal laminates. *Compos B Eng* 3(10): 911-927.
- [2] Kulkarni RR, Chawla KK, Vaidya UK, Koopman MC, Eberhardt AW (2008) Characterization of long fiber thermoplastic/metal laminates. *J Mater Sci* 43(13): 4391-4398.
- [3] Guan ZW, Cantwell WJ, Abdullah R (2009) Numerical modeling of the impact response of fiber-metal laminates. *Polym Compos* 30(5): 603-611.
- [4] Liu Y, Liaw B (2010) Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates. *Appl Compos Mater* 17(1): 43-62.
- [5] Song SH, Byun YS, Ku TW, Song WJ, Kim J, Kang BS (2010) Experimental and numerical investigation on impact performance of carbon reinforced aluminum laminates. *J Mater Sci Technol* 26(4): 327-332.
- [6] Rajkumar GR, Krishna M, Murthy HN, Sharma SC, Mahesh KV (2012) Experimental investigation of low-velocity repeated impacts on glass fiber metal composites. *J Mater Eng Perform* 21(7): 1485-1490.
- [7] Bienias J, Jakubczak P, Surowska B, Dragan K (2015) Low-energy impact behaviour and damage characterization of carbon fibre reinforced polymer and aluminium hybrid laminates. *Arch Civ Mech Eng* 15(4): 925-932.
- [8] Carrillo JG, Gonzalez-Canche NG, Flores-Johnson EA, Cortes P (2019) Low velocity impact response of fibre metal laminates based on aramid fibre reinforced polypropylene. *Compos Struct* 220: 708-716.
- [9] Düring D, Petersen E, Stefaniak D, Hühne C (2020) Damage resistance and low-velocity impact behaviour of hybrid composite laminates with multiple thin steel and elastomer layers. *Compos Struct* 238: 111851.
- [10] Meng X, Yao L, Wang C, He W, Xie L, Zhang H (2020) Investigation on the low-velocity impact behaviour of non-symmetric FMLs-experimental and numerical methods. *Int J Crashworthiness*: 1-19.
- [11] Shahveisi N, Feli S (2020) Analysis of low velocity impact on curved sandwich beams with FML face sheets and flexible core. *Mech Adv Mater Struct*: 1-14.
- [12] Rezasefat M, Mostofi TM, Ozbakkaloglu T (2019) Repeated localized impulsive loading on monolithic and multi-layered metallic plates. *Thin Wall Struct* 144: 106332.
- [13] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-

- experimental and theoretical. *Struct Eng Mech* 56(4): 535-548.
- [24] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin-Walled Struct* 112: 118-124.
- [25] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. *Thin Walled Struct* 107: 257-265.
- [26] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2020) Modeling and prediction of fatigue life in composite materials by using singular value decomposition method. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 234(2): 246-254.
- [27] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2020) Experimental investigation and analytical modelling for forming of circular-clamped plates by using gases mixture detonation. *Proc Inst Mech Eng-Part C J Mech Eng Sci* 234(5): 1102-1111.
- [28] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. *J Modares Mech Eng* 15(4): 361-368.
- [29] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng* 231(3): 490-496.
- [30] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H (2020) Structural response of monolithic and multi-layered circular metallic plates under repeated uniformly distributed impulsive loading: An experimental study. *Thin-Walled Struct* 157: 107024.
- [31] Mostofi TM, Sayah-Badkhor M, Rezasefat M, Ozbakkaloglu T, Babaei H (2020) Gas mixture detonation load on polyurea-coated aluminum plates. *Thin-Walled Struct* 155: 106851.
- [32] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M, Namdari M (2015) Experimental investigation and a model presentation for predicting the behavior of metal and alumina powder compaction under impact loading. *J Modares Mech Eng* 15(5): 357-366.
- [33] Jamali A, Babaei H, Nariman-Zadeh N, Mirzababaie Mostofi T, Ashraf Talesh SH (2020) Multi-objective optimum design of ANFIS for modelling and prediction of deformation of thin plates subjected to hydrodynamic impact loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 234(3): 368-378.
- layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. *Int J Impact Eng* 125: 93-106.
- [14] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2017) The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental investigation and empirical modelling. *Thin Walled Struct* 118: 1-11.
- [15] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M (2016) Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the dynamic plastic behavior of fully clamped thin quadrangular plates. *Thin-Walled Struct* 109: 367-376.
- [16] Mostofi TM, Golbaf A, Mahmoudi A, Alitavoli M, Babaei H (2018) Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to uniform and localized impulsive loading. *Thin-Walled Struct* 123: 48-56.
- [17] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Armoudli E (2017) On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild steel plates subjected to localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part E J Process MechEng* 231(5): 939-950.
- [18] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T (2020) New dimensionless numbers for deformation of circular mild steel plates with large strains as a result of localized and uniform impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 234(2): 231-245.
- [19] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2019) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. *Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl* 233(7): 1449-1471.
- [20] Babaei H, Mostofi T.M, Alitavoli M, Darvizeh A (2016) Empirical modelling for prediction of large deformation of clamped circular plates in gas detonation forming process. *Exp Tech* 40 (6): 1485-1494.
- [21] Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates subjected to shock load due to gas mixture detonation. *Strain* 53(4): e12235.
- [22] Babaei H, Mostofi TM, Namdari-Khalilabad M, Alitavoli M, Mohammadi K (2017) Gas mixture detonation method, a novel processing technique for metal powder compaction: Experimental investigation and empirical modeling. *Powder Tech* 315: 171-181.
- [23] Babaei H, Mostofi TM, Sadraei SH (2015) Effect of gas detonation on response of circular plate-

- gas mixture detonation loading: Part I: Experimental studies. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(1): 71-83.
- [40] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to gas mixture detonation loading: Part II: Analytical and empirical modelling. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(2): 15-29.
- [41] Sayah-Badkhor M, Mostofi TM, Babaei H (2019) Investigation of the influence of standoff distance of explosive charge on the response of circular metallic plates. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 11(2): 175-191.
- [42] Ziya-Shamami M, Babaei H, Mostofi TM, Khodarahmi H (2021) Experimental investigation of large plastic deformation of single-and multi-layered circular aluminum plates under repeated uniform impulsive loading. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 11(2): 123-137.
- [43] Aeini M, Mostofi TM, Sayah-Badkhor M (2021) A study on the ballistic performance of single-layered and multi-layered structures impacted by spherical rigid projectile: experimental investigation and modelling. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 10(4): 125-143.
- [34] Rokhy H, Mostofi TM (2021) 3D numerical simulation of the gas detonation forming of aluminum tubes considering fluid-structure interaction and chemical kinetic model. *Thin-Walled Struct* 161: 107469.
- [35] Haghgoo M, Babaei H, Mostofi TM (2021) 2D numerical study on the deflection of thin steel plate subjected to gaseous detonation wave interaction. *Int J Hydrogen Energy* 46(73): 36348-36368.
- [36] Haghgoo M, Babaei H, Mostofi TM (2021) 3D numerical investigation of the detonation wave propagation influence on the triangular plate deformation using finite rate chemistry model of LS-DYNA CESE method. *Int J Impact Eng* 104108.
- [37] Hosseinzadeh S, Babaei H, Mostofi TM (2021) Impact spot welding of Al/Cu dissimilar metals using gas mixture detonation technique: An experimental investigation and finite element simulation. *J Manuf Processes* 65: 455-470.
- [38] Mostofi TM, Badkhor MS, Ghasemi E (2019) Experimental investigation and optimal analysis of the high-velocity forming process of bilayer plates. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(3): 65-80.
- [39] Mostofi TM, Babaei H (2019) Plastic deformation of polymeric-coated aluminum plates subjected to