



مقایسه رفتار دینامیکی مواد فولادی و آلومینیومی با کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه به روش المان محدود

فرزین عظیم‌پور شیشه‌ان*، حسین رحیمی آسیابراکی، بهمن رحمتی‌نژاد

عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: fazimpoor@tvu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۳۰ آذر ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

المان محدود

ضربه با سرعت پایین

مواد فلزی

کامپوزیت الیاف کربنی

کامپوزیت الیاف شیشه

چکیده

در این تحقیق رفتار مقاومت به ضربه با سرعت پایین برای دو نوع از مواد رایج فلزی فولادی و آلومینیومی و دو نوع ماده کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن و شیشه آنالیز گردیده و نتایج مربوط به آنالیزهای مواد فلزی و کامپوزیتی از جمله تنش‌ها و کرنش‌های فون میزس، تنش برشی ماکزیمم و انرژی کرنشی مربوط به ضربه در این مواد مقایسه گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده فولاد با داشتن تنش فون میزس و برشی بالا و مقادیر کرنش فون میزس و کرنش برشی پایین دارای عملکرد بهتری نسبت به آلومینیوم و مواد کامپوزیتی بود. نمونه فولادی با تحمل مقدار ۲۳۸۱۵ مگاپاسکال دارای بیشترین تنش فون میزس و نمونه کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن با تحمل ۴۷۶۳ مگاپاسکال دارای کمترین مقدار تنش فون میزس بود. بیشترین مقدار کرنش فون میزس در نمونه کامپوزیت الیاف کربن در مقایسه با سایر نمونه‌های فلزی و کامپوزیتی است این افزایش به مقدار حدوداً ۸۷٪ بیشتر از نمونه فولادی می‌باشد که این نشانگر ضعف این مواد در تحمل بارهای ضربه‌ای است. همچنین نمونه کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه دارای کارکرد بهتر در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن است. دلیل این امر خاصیت جذب انرژی بهتر الیاف شیشه در مقایسه با الیاف کربن می‌باشد.

Comparison of dynamic behavior of steel and aluminum materials with epoxy composite reinforced with carbon and glass fibers by FEM

Farzin Azimpour Shishevan*, Hossein Rahimi Asiabaraki, Bahman Rahmatinejad

Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: fazimpoor@tvu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 29 September 2023

Accepted: 21 December 2023

Keywords:

Finite Element

Low Velocity Impact

Metal Materials

Carbon Fiber Composite

Glass Fiber Composite

Abstract

In this research, the impact resistance behavior at low speed is analyzed for two types of common metal materials, steel and aluminum, and two types of epoxy composite materials reinforced with carbon fibers and glass, and the results related to the analyzes of metal and composite materials, including Von Mises stresses and strains, maximum shear stress and impact strain energy were compared in these materials. Based on the obtained results, steel with high Von Mises and shear stress and low Von Mises strain and shear strain had better performance than aluminum and composite materials. The steel sample bearing 23815 MPa had the highest von Mises stress and the composite sample reinforced with carbon fibers bearing 4763 MPa had the lowest von Mises stress. The highest Von Mises strain is in the carbon fiber composite sample compared to other metal and composite samples. This increase is about 87% more than the steel sample. This indicates the weakness of these materials in bearing shock loads. Also, the glass fiber reinforced composite sample has better performance compared to the carbon fiber reinforced epoxy composites. The reason for this is the better energy absorption properties of glass fibers compared to carbon fibers.

Please cite this article using:

Azimpour Shishevan F, Rahimi Asiabaraki H, Rahmatinejad B. Comparison of dynamic behavior of steel and aluminum materials with epoxy composite reinforced with carbon and glass fibers by FEM. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 August 23;10(6):40-52. doi: 10.22034/IJME.2023.418523.1845 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

استفاده از مواد کامپوزیت در سال‌های اخیر به دلیل سبک بودن و مقاومت بالای این مواد در صنایع ساخت سازه‌های متحرک از جمله صنعت خودرو، هوافضا و صنایع دریایی و نظامی رواج زیادی پیدا کرده است [۱-۳]. مقاومت ویژه بالای این نوع از مواد که ناشی از استحکام بالای این مواد نسبت به وزن بسیار پایین آن‌ها است، سبب گردیده که این مواد در تمامی بخش‌های صنایع مختلف به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اولویت‌ها مطرح گردد [۴]. سعی در سبک‌سازی خودروها در راستای افزایش شتاب و کاهش مصرف سوخت و به تبع آن کاهش آلایندگی و سازه‌های فضایی با هدف طی مسافت‌های بالا با مقدار سوخت محدود تبدیل به مهم‌ترین چالش در پروژه‌های تحقیقاتی مرتبط با این صنایع گردیده است [۵]. علیرغم تمام مزایای این مواد از جمله موارد ذکر شده و قابلیت استفاده از مواد مناسب به‌عنوان فاز تقویت‌کننده و فاز زمینه بر اساس شرایط استفاده از این مواد در محیط‌ها و بارگذاری‌های مختلف ضعف این مواد در برابر بارهای ضربه‌ای که باعث انتقال نقطه‌ای و آنی انرژی به ساختار سازه گردیده و باعث به وجود آمدن میکرو ترک‌ها به تبع آن لایه‌لایه شدگی در ساختار کامپوزیت می‌گردد تا حدودی کاربرد این مواد را محدود کرده و استفاده از این مواد را منوط به انجام تست‌های پیش از استفاده در کاربردهای حساس نموده است [۶]. از آنجایی که ساخت این مواد هزینه‌بر بوده و جهت تشخیص نوع ماده برای استفاده در یک شرایط ویژه نیازمند انجام تست‌های متنوع بر اساس شرایط کارکرد آن می‌باشد. استفاده از روش‌های دیگر همانند مدل‌سازی و تحلیل و آنالیز این مواد با استفاده از روش‌های المان محدود در سال‌های اخیر رواج بسیاری یافته است [۷-۹]. با استفاده از این روش‌ها محققین فعال در صنعت کامپوزیت می‌توانند سازه موردنظر را از مواد کامپوزیت طراحی کرده و آن را تحت بارگذاری مجازی در نرم‌افزار قرار داده و رفتار سازه را بررسی کنند. با توجه به عکس‌العمل ماده استفاده‌شده در سازه در قالب تحلیل‌های تخصصی انجام‌شده توسط نرم‌افزار طراح می‌تواند نوع مواد استفاده‌شده در ساختار کامپوزیت به‌عنوان فاز تقویت‌کننده و زمینه را تغییر داده و مواد مناسب جهت کارکرد بهتر را انتخاب کند. این موضوع علاوه بر صرفه‌جویی در زمان باعث پایین آمدن هزینه‌های مربوط به طراحی و ساخت سازه‌ها می‌گردد. پایین آمدن هزینه‌های ساخت برای سازه سبب بهینه شدن طرح گردیده و قدرت رقابت سازه در صنعت را بالا می‌برد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در این راستا صورت گرفته است. صیفوری و حسینی [۱۰] با کمک روش‌های عددی و المان محدود تأثیر شکل پرتابه در رفتار ضربه با سرعت پایین صفحات کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق برای بررسی اثر شکل پرتابه سه نوع ضربه‌زننده کرومی، مخروطی و استوانه‌ای سر تخت مدل‌سازی شد. بدین منظور زمان برخورد، بیشینه وضعیت جابجایی مرکز ورق و نیروی تماس برای سه ضربه‌زننده مختلف به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در انتهای تحقیق نتایج عددی و تحلیلی به‌دست‌آمده در این پژوهش با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقادیر دارای تطابق و همگرایی خوبی بودند. همچنین در همه پرتابه‌ها، بیشینه جابجایی در مرکز ورق در هنگامی که لایه‌لایه شدگی اتفاق می‌افتد، بیشتر از زمانی است که آسیبی رخ نمی‌دهد. همچنین طبق نتایج به‌دست‌آمده بیشینه جابجایی در مرکز ورق برای هر دو حالت با و بدون لایه‌لایه شدگی برای پرتابه تخت در مقایسه با دیگر پرتابه‌ها کمتر است و بعکس بیشینه نیروی تماس برای هر دو حالت با و بدون لایه‌لایه شدگی برای پرتابه تخت بیشتر است. بین هی و همکارانش [۱۱] تأثیر کسر حجمی الیاف روی استحکام نهایی مواد کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن به‌صورت عددی و تجربی را بررسی نمودند. نتایج تجربی و تحلیلی آن‌ها نشان داد که افزایش کسر حجمی الیاف، نسبت بار تحملی الیاف و در نتیجه کل بار تحمل شده توسط کامپوزیت را افزایش می‌دهد و همچنین تقویت زمینه با استفاده از الیاف کربنی، مقادیر کرنش‌ها را کاهش داده و سبب افزایش مقاومت کششی و چقرمگی شکست می‌گردد. از طرفی تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد که توزیع تنش در قطعه کامپوزیتی در امتداد الیاف به‌شدت به درصد حجمی الیاف مصرفی وابسته است. در این پژوهش جهت سنجش دقت نتایج روش المان محدود، نتایج به‌دست‌آمده از این روش با نتایج تجربی کارهای مشابه مقایسه گردید. نتایج مقایسه از هم‌پوشانی خوب نتایج المان محدود با نتایج تجربی خبر می‌دهد. هسور و همکارانش [۱۲] در تحقیق خود به بررسی رفتار تجربی ضربه با سرعت پایین دو نوع ماده کامپوزیت شامل کامپوزیت‌های با زمینه اپوکسی و تقویت‌شده با الیاف کربن و الیاف شیشه پرداخته‌اند. آن‌ها در تحقیق صورت گرفته به بررسی تأثیرات نوع بافت الیاف در رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت پرداخته و در این زمینه رفتار کامپوزیت‌ها با دو نوع بافت مختلف شامل بافت ساده و بافت جناغی را مقایسه کرده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده کامپوزیت‌های با نوع بافت جناغی رفتار ضربه بهتری نسبت به نوع بافت ساده از خود نشان داده‌اند. سیمون و همکارانش

[۱۳] رفتار ضربه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن را در تست‌های ضربه با سرعت‌های بالا و پایین به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق تورق به وجود آمده در ساختار کامپوزیت برای هر دو حالت با سرعت پایین و بالا در انرژی‌های یکسان مشابه بوده و دندان‌های به وجود آمده در منحنی نیرو بر حسب تغییر مکان در حالت ضربه با سرعت بالا دارای دامنه بیشتری می‌باشند. ساداسیوم و همکارانش [۱۴] تأثیرات نوع ماتریس را بر رفتار ضربه کامپوزیت بررسی کردند. در این تحقیق رفتار ضربه دو نوع از کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه با ماتریس‌های ترموست و ترموپلاست مقایسه گردیده است. علاوه بر این، مقاومت به کشش کامپوزیت‌های مورد نظر بعد از تست ضربه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. عظیم پور و همکارانش [۱۵] رفتار ضربه‌ای با سرعت کم کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی جناغی اصلاح شده توسط نانوذرات گرافن را بررسی نموده و نشان دادند اضافه کردن نانوذرات گرافن به ماتریس کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت باعث بهبود افزایش نیروی تماس و کاهش انرژی جذب شده در حالت برگشتی، رفتار ضربه‌ای با سرعت پایین می‌شود. سایبر و همکارانش [۱۶] به بررسی اثر ضربه بر روی صفحات کامپوزیتی ترکیبی پرداختند. آن‌ها میزان انرژی وارد بر دو نوع کامپوزیت ترکیبی شیشه-کربن/اپوکسی را به طور مرتب افزایش دادند تا انرژی لازم برای سوراخ شدن نمونه‌ها را به دست آورند. نتایج آن‌ها نشان داد هنگامی که کامپوزیت ترکیبی از طرف سطح ساخته شده با الیاف کربن تحت ضربه قرار می‌گیرد، نسبت به برخورد ضربه‌زننده به سطح ساخته شده از الیاف شیشه برای سوراخ شدن ۳۰ درصد انرژی بیشتر جذب می‌کند. وانگ و همکارانش [۱۷] مقاومت در برابر ضربه سرعت پایین و استحکام کششی باقی مانده در لمینت کامپوزیتی ساخته شده از الیاف کربن را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در بررسی خود از آزمون سقوط وزنه، آزمون کشش و حل المان محدود استفاده نمودند. با استفاده از تحلیل المان محدود توانستند نیروی تماسی ضربه و استحکام کششی را به خوبی تخمین بزنند. بوراک و همکارانش [۱۸] اثر ضربه سرعت پایین و پاسخ خم شدن اتصالات دو بند تقویت شده با نانوذرات گرافن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در کار خود میزان درصد نانوذرات گرافن را ۱، ۲ و ۳ درصد در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت ضربه اتصالات تحت ضربه سرعت پایین با استفاده از تقویت گرافن افزایش پیدا کرده است. عظیم پور و همکارانش [۱۹] در تحقیق دیگر اثرات افزودن اکسید گرافن^۱ (GO) بر عملکرد ضربه‌ای با سرعت پایین کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف آرامید را بررسی نمودند. نانوذرات اکسید گرافن در ماتریس کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف آرامید^۲ (AFRP) در سه درصد وزنی مختلف ۰،۱ درصد، ۰،۳ درصد و ۰،۵ درصد، به روش قالب‌گیری تزریقی رزین به کمک خلأ ساخته شد. نتایج نشان داد کامپوزیت AFRP با ۰،۳ درصد وزنی نانوذرات GO بهترین عملکرد را تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین دارد. با این حال، تجمع نانوذرات زمانی که درصد‌های بالاتری از نانوذرات GO به ساختار کامپوزیت اضافه می‌شود، به یک چالش مهم تبدیل شد. برای شناخت کامل رفتار کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه و مقایسه آن‌ها با مواد فولادی و آلومینیومی به کاررفته در بدنه خودرو از روش المان محدود استفاده شد و تأثیرات ضربه با سرعت پایین بر رفتار دینامیکی آن‌ها مقایسه گردید.

۲- مدل سازی و تحلیل المان محدود

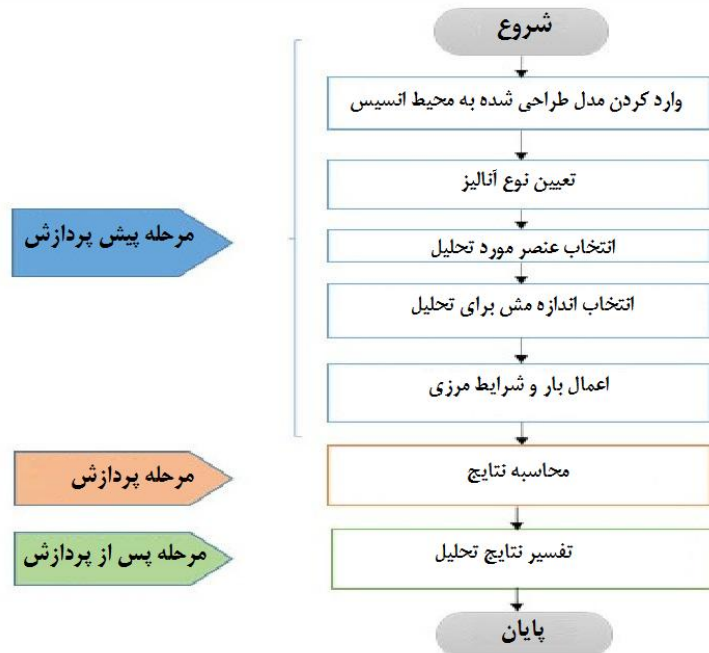
شکل ۱ فلوچارت مدل سازی این مواد را در نرم افزار انسیس نشان می‌دهد.

بسته به هدف تجزیه و تحلیل، می‌توان از تکنیک‌های مدل سازی مختلفی برای کامپوزیت‌ها استفاده کرد:

- ❖ مدل سازی میکروسکوپی: ماتریس و مواد تقویت کننده هر دو به طور جداگانه به عنوان پیوسته تغییر شکل پذیر مدل سازی می‌شوند.
- ❖ مدل سازی ماکروسکوپی: کامپوزیت به عنوان یک ماده منفرد ارتوتروپیک یا یک ماده کاملاً ناهمسانگرد مدل می‌شود.
- ❖ مدل سازی مختلط: کامپوزیت توسط تعدادی لایه‌های تقویت شده مجزا و مدل سازی شده ماکروسکوپی مدل سازی می‌شود.
- ❖ مدل سازی گسسته تقویت شده: تقویت مدل سازی شده با عناصر گسسته یا سایر ابزارهای مدل سازی (به عنوان مثال، میلگرد).
- ❖ مدل سازی فرعی: برای مطالعه غلظت تنش در اطراف نوک الیاف تقویت کننده مفید است.

¹ Graphene Oxide

² Aramid Fiber Reinforced Polymer



شکل ۱ فلوجارت تحلیل در نرم افزار المان محدود

جهت بررسی رفتار ضربه مواد پیشرفته کامپوزیتی و مقایسه آن با مواد رایج فلزی سه نوع از این مواد با ترکیب‌های الیاف و مواد زمینه‌ای مختلف مشتمل بر کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن^۱ (CFRP)، کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه^۲ (GFRP) و کامپوزیت لانه زنبوری^۳ در نرم افزار انسیس وک بنچ مدل سازی گردیده و تحت بارگذاری ضربه با سرعت پایین قرار گرفت. به تبع آن و جهت مطالعه رفتار ضربه مواد فلزی نمونه‌های مدل سازی شده از دو جنس رایج مورد استفاده در بدنه خودرو یعنی فولاد و آلومینیوم تحت بارگذاری ضربه‌ای قرار گرفته و رفتار این مواد تحت این نوع بارگذاری مقایسه گردد. با توجه به نوع تحلیل و مدل مورد بررسی در این تحقیق از المان 91 SHELL استفاده شد. این المان امکان مدل سازی حداکثر ۱۰۰ لایه را با قابلیت تحلیل‌های غیرخطی؛ تحلیل‌های الاستوپلاستیک؛ کرنش‌های بزرگ و مدل سازی سازه‌های ساندویچی را دارد. نمونه‌های مدل سازی شده با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی متر مربع و به ضخامت ۳۰ میلی متر بوده است. مشخصات مکانیکی مواد سازنده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مواد مدل سازی شده

ماده	آلومینیوم	فولاد	کامپوزیت الیاف شیشه	کامپوزیت الیاف کربنی
مدول الاستیسیته	۷۲	۲۰۷	۲۵	۷۰
مقاومت کششی	۴۶۰	۹۹۰	۴۴۰	۱۵۰۰
چگالی	۲۷۷۰	۷۸۵۰	۲۴۹۰	۱۸۵۰

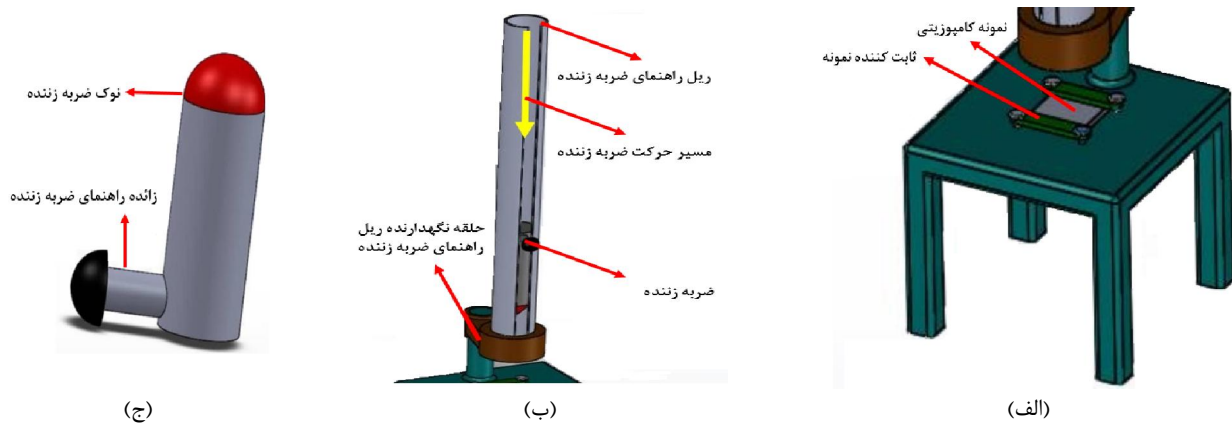
¹ Carbon Fibre Reinforced Polymer

² Glass Fiber Reinforced Polymer

³ Honeycomb

۲-۱- طراحی دستگاه ضربه با سرعت پایین

برای بررسی رفتار کامپوزیت‌ها تحت ضربه سرعت پایین، نمونه‌ها تحت ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرد. با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش ضربه سرعت پایین میزان خرابی از جمله شکست الیاف، تورق و شکست ماتریس را می‌توان بررسی کرد. در این تحقیق جهت انجام تست ضربه از دستگاه سقوط آزاد ضربه‌زننده^۱ استفاده شد که طرح‌واره کلی آن در نرم‌افزار سالدورکس طراحی گردیده و در شکل ۲ الف نمایش داده شده است. جزء ضربه‌زننده^۲ (شکل ۲ ج) که استوانه‌ای با نوک کروی و به جرم ۴/۶ کیلوگرم است، داخل راهنمای ضربه‌زننده^۳ (شکل ۲ ب) که به شکل لوله‌ای استوانه‌ای شیاردار است حرکت می‌کند. این استوانه به‌عنوان راهنمای ضربه‌زننده بوده و دارای ارتفاع ۴ متر است، چارچوب نگه‌دارنده نمونه^۴ دارای ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر مربع بوده و نمونه را جهت انجام تست ضربه مهار کرده و از حرکات ارتعاشی آن در حین ضربه جلوگیری می‌کند.



شکل ۲ اجزای دستگاه تست ضربه با سرعت پایین، الف) دستگاه سقوط آزاد، ب) راهنمای نمونه، ج) ضربه‌زننده

دستگاه به‌گونه‌ای طراحی گردیده است که می‌توان با استفاده از تغییر ارتفاع سقوط ضربه‌زننده در داخل راهنمای دستگاه، انرژی برخورد را تغییر داده و رفتار نمونه در ضربات با انرژی‌های مختلف را بررسی نمود. کل مدت تست ضربه ۳ ثانیه به طول انجامیده و در طی این مدت ضربه‌زننده سقوط کرده و در حالتی پایدار به نمونه مورد نظر ضربه می‌زند. سائز المان انتخاب‌شده جهت مش‌بندی نمونه ۰/۰۰۵ میلی‌متر انتخاب گردیده است. طبیعتاً با تغییر سائز المان نتایج تست تغییر می‌کند. از آنجایی که تحقیق انجام‌شده حالت مقایسه‌ای دارد سائز المان در صورت یکسان بودن در تمامی نمونه‌ها نتایج تحقیق را تحت‌الشعاع قرار نخواهد داد. با استفاده از تنظیمات مربوط به ماژول‌های نتایج می‌توان نتایج متعددی از جمله انواع تنش‌های عمودی، برشی و انرژی‌های کرنشی را مورد بررسی قرار داده و نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه‌های مختلف را مقایسه کرد. مش‌بندی سطوح تماسی در ضربه‌زننده و نمونه بایستی به‌گونه‌ای انجام شود که در حین برخورد تداخل سطوح به وجود نیاید. بدین منظور سطح ضربه‌زننده بایستی با المان‌های سخت و سطح نمونه با المان‌های نرم مش‌بندی شود.

۲-۲- روابط مدل المان محدود

انرژی جنبشی $E_k(t)$ هنگامی رخ می‌دهد که جرم m با سرعت v_0 با صفحه کامپوزیت برخورد کند. این مقدار توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$E_k(t) = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{m[v_i(t)]^2}{2} \quad (1)$$

مقادیر سرعت ضربه‌زننده را می‌توان از رابطه ۲ به دست آورد. نیروی F در این رابطه به‌طور تجربی به دست می‌آید [۲۰].

¹ Drop Weight

² Impactor

³ Impactor Guide

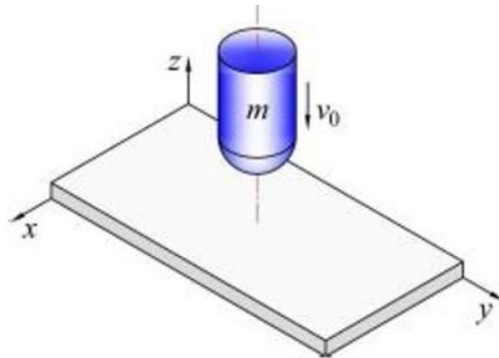
⁴ Fixture

$$V_i(t) = V_0 - \frac{1}{m} \int_0^t F dt \quad (2)$$

بنابراین انرژی ضربه‌ای که در صفحه کامپوزیت ایجاد می‌شود مطابق رابطه ۳ مجموع انرژی الاستیک E_e و انرژی جذب شده E_a می‌باشد:

$$E_k(t) = E_e + E_a \quad (3)$$

ناحیه انرژی الاستیک نشان دهنده مقدار انرژی برگشتی از نمونه کامپوزیت است. شکل ۳ لحظه تماس ضربه زننده بر روی صفحه کامپوزیت را نشان می‌دهد. در لحظه t ، معادله تعادل را می‌توان از رابطه ۴ به دست آورد.



شکل ۳ لحظه تماس ضربه زننده به نمونه

$$\sigma_{ij,j}^t = \rho^t \ddot{u}_i + \mu^t \dot{u}_i \quad (4)$$

که در آن ρ^t و μ^t به ترتیب چگالی و ضریب اصطکاک دینامیکی ورق در لحظه t باشد.

$$\sigma_{ij}^t n_j - \bar{T}_i^t = 0 \quad (\text{on } S_\sigma) \quad (5)$$

که در آن S_σ نشان دهنده مرز تنش می‌باشد.

با ادغام معادله تعادل و شرایط مرزی بار رابطه ۶ ایجاد می‌شود:

$$\int_V \delta u_i (\sigma_{ij,j}^t - \rho^t \ddot{u}_i - \mu^t \dot{u}_i) dV - \int_{S_\sigma} \delta u_i (\sigma_{ij}^t n_j - \bar{T}_i^t) dS = 0 \quad (6)$$

از آنجایی که در طول تغییر شکل کامپوزیت تحت بار ضربه‌ای با سرعت پایین، غیرخطی هندسی وجود خواهد داشت، تانسور کرنش در لحظه t را می‌توان با رابطه ۷ بیان نمود:

$$\varepsilon_{ij}^t = \frac{1}{2} (u_{i,j}^t + u_{j,i}^t + u_{k,i}^t u_{k,j}^t), \quad (i, j, k = x, y, z) \quad (7)$$

رابطه ۷ را می‌توان به صورت ترکیب خطی و غیرخطی به شکل رابطه ۸ در نظر گرفت:

$$\varepsilon = \varepsilon_L + \varepsilon_{NL} \quad (8)$$

در آن زمان رابطه بین σ_{ij}^t و ε_{kl}^t از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$\sigma_{ij}^t = \bar{Q}_{ijkl}^{t-\Delta t} + \varepsilon_{kl}^t \quad (9)$$

که در آن ماتریس الاستیسیته مواد در لحظه $t - \Delta t$ می‌باشد و می‌توان آن را با تبدیل مختصات به دست آورد.

$$\bar{Q}_{ijkl}^{t-\Delta t} = [T] Q^{t-\Delta t} [T]^T \quad (10)$$

با استفاده از روابط ۸ و ۹ می‌توان معادله تنش در هر لحظه را نوشت و موارد مرتبه بالاتر را حذف نمود. در این حالت رابطه ۱۱ حاصل می‌شود [۲۰]:

$$\int (\delta \varepsilon_{ij} \bar{Q}_{ijkl}^{t-\Delta t} \varepsilon_{kl} + \delta u_i \rho^t \ddot{u}_i - \delta u_i \mu^t \dot{u}_i) dV + \int_{V_{n-1}} \sigma_{ij}^{n-1} \delta (\Delta \eta_{ij}) dV = \int_{S_\sigma} \bar{T}_i^n \delta u_i dS \quad (11)$$

که در آن \bar{T}_i^n و \bar{T}_i^t نیروی سطحی در لحظه t هستند. N تعداد تکرار؛ $\delta\varepsilon_{ij}$ نشان دهنده کرنش در لحظه t ؛ $\Delta\eta_{ij}$ عبارت غیرخطی افزایش کرنش است. رابطه ۱۱ را می توان به روش المان محدود حل نمود و پس از گسسته سازی رابطه تعادل ۱۲ را به دست آورد [۲۱]:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (12)$$

با توجه به شرایط اولیه $u(t=0) = u_0$ و $\dot{u}(t=0) = \dot{u}_0$ است و M ، C و K به ترتیب ماتریس های جرم کل، میرایی و سختی می باشند. همچنین F بردار بارهای خارجی است. با توجه به الگوریتم ارائه شده در رابطه ۱۳ و ۱۴ می توان رابطه ۱۲ را حل نمود.

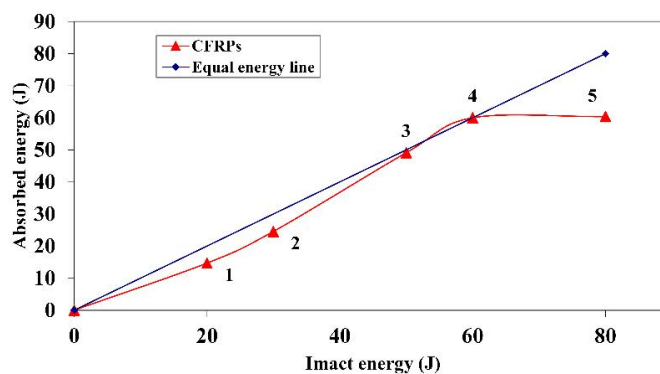
$$\dot{U}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{U}_{n-\frac{1}{2}} + \ddot{U}\Delta t \quad (13)$$

$$U_{n+1} = U_n + \dot{U}_{n+\frac{1}{2}}\Delta t \quad (14)$$

انرژی کل را برای هر چرخه می توان با توجه به اصل بقای انرژی محاسبه نمود و با تعریف یک حد آستانه می توان در صورتی که از آن مقدار تجاوز نمود راه حل مورد نظر را ناپایدار در نظر گرفته و متوقف شود.

۳- نتایج و بحث

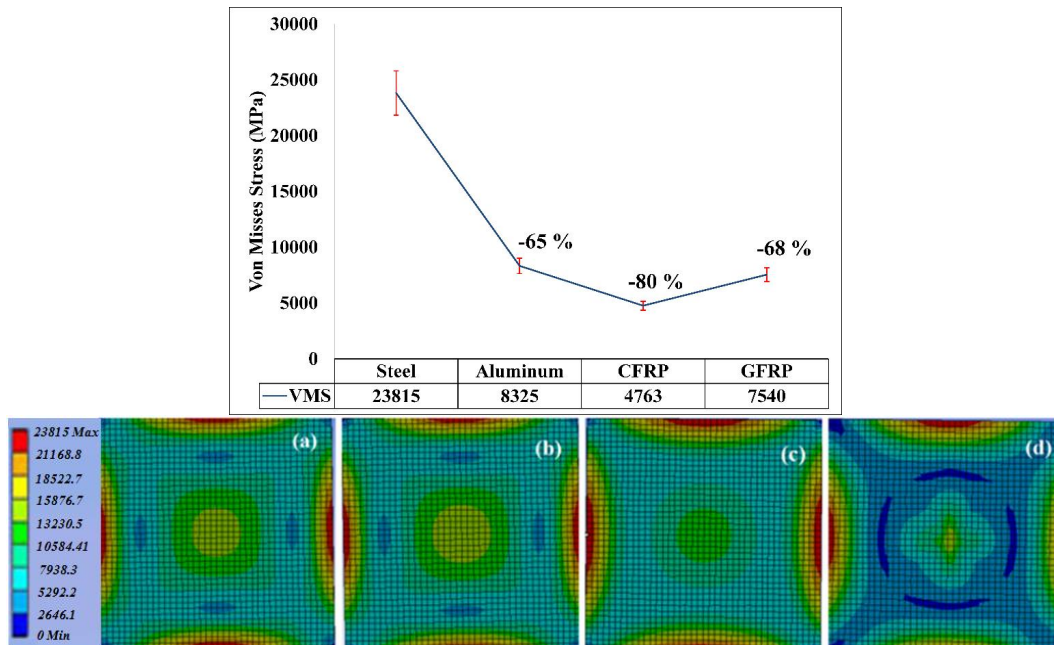
یکی از مهم ترین مواردی که لازم است قبل از آغاز تست های اصلی جهت انجام تست ضربه اندازه گیری شود انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ شدگی است. این انرژی با استفاده از روش پروفایل انرژی تعیین می شود. در این روش نمونه های ماده مورد نظر با انرژی های مختلف که از مقادیر کم آغاز می شوند مورد اصابت پرتابه قرار می گیرند. هدف از این مرحله تشخیص انرژی آستانه فرورفتگی و سوراخ شدگی است. انرژی آستانه فرورفتگی مقدار انرژی است که در این حالت پرتابه در داخل نمونه فرو می رود و بدین ترتیب تمام انرژی پرتابه توسط نمونه جذب می شود. در این حالت مقدار انرژی جذب شده با انرژی ضربه برابر می شود. مقدار این انرژی در مقاله [۲۲] برای مواد کامپوزیت ۶۰ ژول اندازه گیری شده بود؛ بنابراین انرژی ضربه مرجع ۶۰ ژول انتخاب می گردد. در این حالت مقدار انرژی جذب شده با انرژی ضربه برابر شده و نقطه انرژی بر روی خط انرژی معادل قرار می گیرد. انرژی آستانه سوراخ شدگی حداقل انرژی لازم برای عبور پرتابه از نمونه است. دیاگرام پروفایل انرژی برای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن در شکل ۴ داده شده است.



شکل ۴ دیاگرام پروفایل انرژی معادل ضربه برای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن

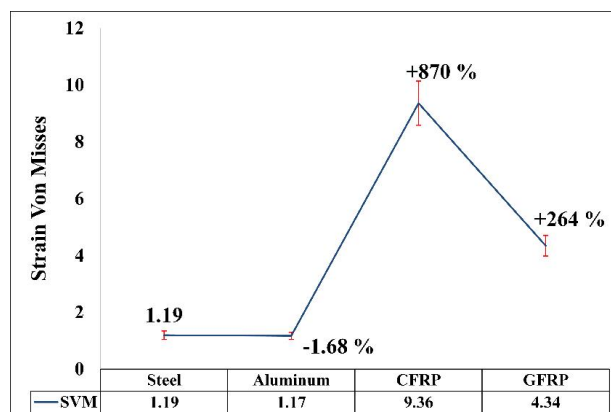
با توجه به دیاگرام پروفایل انرژی معادل ضربه برای کامپوزیت پنج تست با انرژی های مختلف بر روی ماده انجام شده است. سه تست اول با انرژی های ۲۰، ۳۰ و ۵۰ ژول انجام گردیده که در این تست ها مقدار انرژی ضربه جهت سوراخ کردن نمونه کافی نبوده و پرتابه پس از برخورد با نمونه مقداری از انرژی خود را به آن داده و از سطح نمونه بازگشته است. در این حالت نقطه انرژی در قسمت زیر خط انرژی معادل قرار گرفته و با افزایش مقدار انرژی ضربه تا مقدار ۶۰ ژول همان گونه که در شکل ۴ نیز دیده می شود نقطه انرژی بر روی خط انرژی معادل قرار گرفته است که در این حالت تمامی انرژی پرتابه توسط نمونه جذب شده و پرتابه در نمونه فرو رفته است. به این مقدار انرژی آستانه فرورفتگی گفته می شود. با افزایش انرژی ضربه تا مقدار ۸۰ ژول پرتابه پس از برخورد با نمونه آن

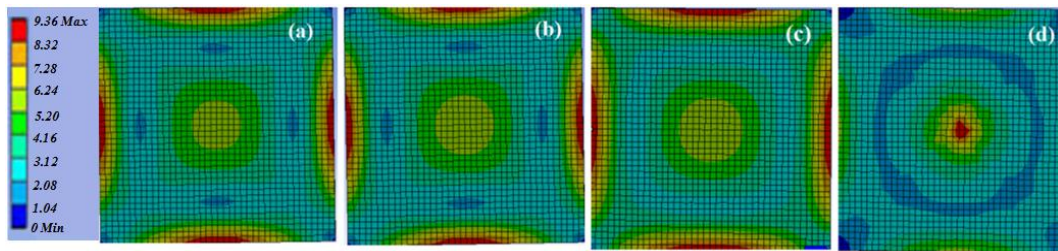
را سوراخ کرده و از آن عبور کرده است. در این حالت که با نقطه انرژی ۵ نمایش داده شده است انرژی جذب شده توسط نمونه در طی فرایند ضربه کمتر از انرژی ضربه بوده است. نمودار تغییرات تنش فون میزس و کانتورهای آن برای مواد فلزی آلومینیوم، فولاد و کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵ نمودار تغییرات تنش فون میزس و کانتورهای تنش فون میزس تحت بار ضربه‌ای برای (a) نمونه فولادی، (b) نمونه آلومینیومی، (c) نمونه کامپوزیتی الیاف کربن، (d) نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه

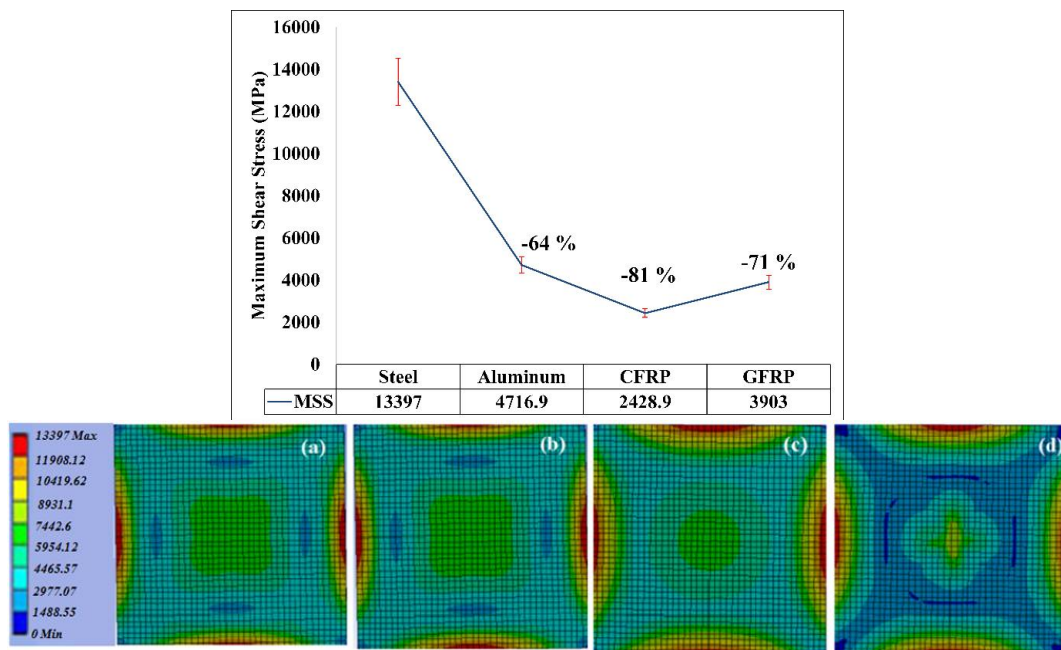
بر اساس نتایج نمایش داده شده در نمودار شکل ۵ نمونه فولادی با دارا بودن مقدار ۲۳۸۱۵ مگاپاسکال دارای بیشترین تنش فون میزس از میان مواد تست شده است و این نشان‌دهنده مقاومت بسیار بالای این مواد در مقابل بارهای ضربه‌ای با انرژی پایین است. این در حالی است که نمونه آلومینیومی با ۸۳۲۵ مگاپاسکال بعد از نمونه فولادی بیشترین مقدار تنش فون میزس را دارا است. اختلاف ۶۵ درصدی بین تنش فون میزس نمونه فولادی با نمونه آلومینیومی قابل توجه است. با توجه به نمودار ضعف مواد کامپوزیتی در مقابل بارهای ضربه‌ای در مقایسه با مواد فلزی مشهود است. با توجه به نمودار شکل ۵ از میان نمونه‌های تست شده نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن دارای کمترین مقدار تنش فون میزس است که با توجه به ساختار لایه‌ای کامپوزیت‌ها و ضعف الیاف کربن در مقابل بارهای ضربه‌ای نتیجه‌ای قابل قبول به نظر می‌رسد. نمودار تغییرات کرنش فون میزس و کانتورهای آن برای مواد فلزی آلومینیوم، فولاد و کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه در شکل ۶ نمایش داده شده است.





شکل ۶ نمودار تغییرات کرنش فون میزس و کانتورهای کرنش فون میزس تحت بار ضربه‌ای برای (a) نمونه فولادی، (b) نمونه آلومینیومی، (c) نمونه کامپوزیتی الیاف کربن، (d) نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه

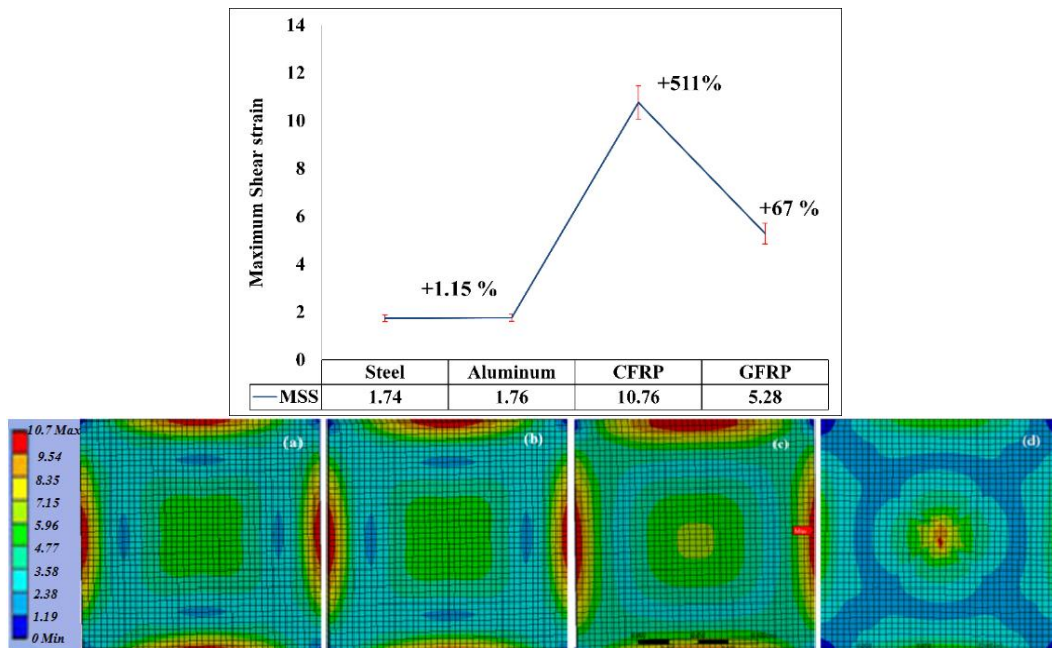
نتایج نشان داده شده در شکل ۶ حاکی از بیشترین مقدار کرنش فون میزس در نمونه کامپوزیت الیاف کربن در مقایسه با سایر نمونه‌های فلزی و کامپوزیتی است که این نشانگر ضعف این مواد در تحمل بارهای ضربه‌ای است. نتایج نمودار شکل ۶ نشان‌دهنده افزایش ۸۷٪ مقدار کرنش در نمونه کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن در مقایسه با نمونه فولادی است. رفتار نمونه‌های فلزی از جنس آلومینیوم و فولاد از دید میزان کرنش فون میزس حاصل از بارهای ضربه‌ای تقریباً مشابه همدیگر است. این در حالی است که نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه با مقدار کرنش ۴/۳۴ عکس‌العملی مابین نمونه‌های فلزی و کامپوزیت الیاف کربن داشته است. نمودار تغییرات تنش برشی ماکزیمم و کانتورهای آن برای مواد فلزی آلومینیوم، فولاد و کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷ نمودار تغییرات تنش برشی ماکزیمم و کانتورهای تنش برشی ماکزیمم تحت بار ضربه‌ای برای (a) نمونه فولادی، (b) نمونه آلومینیومی، (c) نمونه کامپوزیتی الیاف کربن، (d) نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه

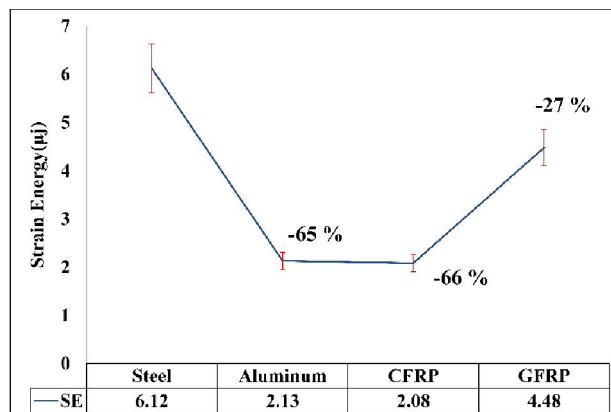
با توجه به نتایج نمودار شکل ۷ مشابه نتایج تنش عمودی نمونه فولادی دارای بیشترین مقدار تنش برشی ۱۳۳۹۷ مگاپاسکال است. مقدار تنش برشی برای نمونه آلومینیومی با ۶۴ درصد کاهش به مقدار ۴۷۱۶/۹ رسیده است. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار تنش برشی نمونه کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن ۲۴۲۸/۹ مگاپاسکال است که این مقدار در مقایسه با تنش برشی نمونه فولادی ۸۱ درصد کاهش داشته است که می‌تواند ناشی از ساختار لایه‌لایه کامپوزیت‌ها باشد که این ساختار لایه‌ای در اثر ورود انرژی بار ضربه‌ای در ساختار کامپوزیت و ایجاد میکرو ترک‌ها و پیوستن آن‌ها به هم و ایجاد ترک‌ها و به تبع آن به وجود آمدن پدیده

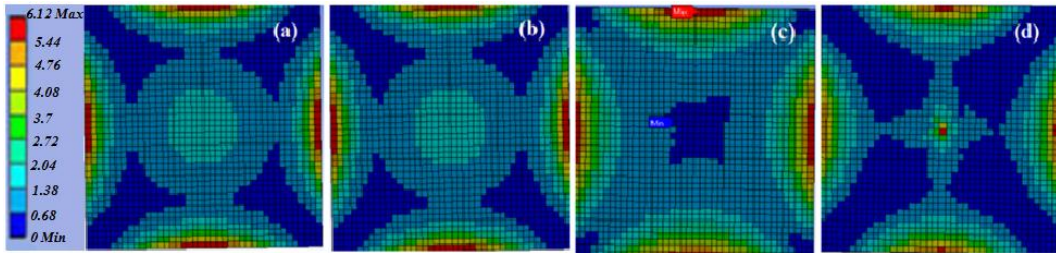
تورق متلاشی شده و مقاومت آن به شدت کاهش می یابد. نمودار کرنش برشی ماکزیمم و کانتورهای آن تحت بارهای ضربه ای برای مواد فلزی آلومینیوم، فولاد و کامپوزیت های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸ نمودار تغییرات کرنش برشی ماکزیمم و کانتورهای کرنش برشی ماکزیمم تحت بار ضربه ای برای (a) نمونه فولادی، (b) نمونه آلومینیومی، (c) نمونه کامپوزیتی الیاف کربن، (d) نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه

با توجه به نمودار شکل ۸ به سادگی می توان به مشابهت نتایج مربوط به کرنش برشی ماکزیمم و کرنش برشی فون میزس نشان داده شده در نمودار شکل ۵ پی برد. نتایج نمودار کرنش برشی ماکزیمم حاکی از مقدار ۱/۱۵ کرنش برای نمونه فولادی است که این مقدار با ۱/۱۵ درصد افزایش به مقدار ۱/۷۶ برای نمونه آلومینیومی رسیده است. این در حالی است که مقدار کرنش برشی برای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن به مقدار ۱۰/۷۶ رسیده که نشانگر ۵۱۱ درصد افزایش نسبت به نمونه فولادی است. نتایج کرنش برشی ماکزیمم برای کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه مشابه نتایج سایر فاکتورها، حاکی از رفتار بینابینی این نمونه ها میان نمونه های فلزی و نمونه کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن است. نمودار تغییرات انرژی کرنشی و کانتورهای آن تحت بارهای ضربه ای برای مواد فلزی آلومینیوم، فولاد و کامپوزیت های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه در شکل ۹ نمایش داده شده است.





شکل ۹ نمودار تغییرات انرژی کرنشی ماکزیمم و کانتورهای انرژی کرنشی تحت بار ضربه‌ای برای (a) نمونه فولادی، (b) نمونه آلومینیومی، (c) نمونه کامپوزیتی الیاف کربن، (d) نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه

نتایج نمایش داده شده در نمودار شکل ۹ حاکی از بالا بودن انرژی کرنشی نمونه فولادی نسبت به سایر نمونه‌های فلزی و کامپوزیتی تست شده است. بر اساس این نتایج انرژی کرنشی نمونه آلومینیومی نسبت به نمونه فولادی ۶۵ درصد کاهش یافته است. این در حالی است که مقدار کاهش انرژی کرنشی برای نمونه کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه ۲۷ درصد است. از میان تمام نمونه‌های تست شده نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن دارای کمترین مقدار انرژی کرنشی در مقایسه با سایر نمونه‌های تست شده است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری انرژی کرنش تحت بار ضربه‌ای مشابه نتایج فاکتورهای قبلی نشانگر بالا بودن مقاومت به ضربه نمونه‌های فولادی در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی است. از طرفی دیگر نتایج نمودار حاکی از کارکرد بهتر نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن است. دلیل این امر خاصیت جذب انرژی بهتر الیاف شیشه در مقایسه با الیاف کربن است. از سوی دیگر الیاف کربن به دلیل دارا بودن فاکتورهای خنثای سطحی قابلیت ضعیف‌تری در برقراری پیوند با مولکول‌های اپوکسی است که این امر سبب حساس بودن این نوع از کامپوزیت‌ها به دریافت انرژی ضربه‌ای و عملکرد ضعیف این نوع از کامپوزیت‌ها در مقابل بارهای می‌گردد. نتایج تست ضربه برای مواد تست شده فلزی و کامپوزیتی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲ نتایج تست ضربه با سرعت پایین برای مواد فلزی آلومینیوم، فولاد و کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه

				ماده
کامپوزیت الیاف کربنی	کامپوزیت الیاف شیشه	فولاد	آلومینیوم	نتایج
۴۷۶۳	۷۵۴۰	۲۳۸۱۵	۸۳۲۵	تنش فون میزس (MPa)
۹/۳۶	۴/۳۴	۱/۱۹	۱/۱۷	کرنش فون میزس
۲۴۲۸/۹	۳۹۰۳	۱۳۳۹۷	۴۷۱۶/۹	تنش برشی ماکزیمم (MPa)
۱۰/۷۶	۵/۲۸	۱/۷۴	۱/۷۶	کرنش برشی ماکزیمم
۲/۰۸	۴/۴۸	۶/۱۲	۲/۱۳	انرژی کرنشی (J)
۶۲/۳۴	۵۴/۴۵	۴۵/۷۶	۳۳/۲۳	ماکزیمم انرژی جذب شده (J)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار و مقاومت به ضربه با سرعت پایین در نمونه‌های فلزی از جنس‌های فولاد و آلومینیوم با نمونه‌هایی از مواد مدرن کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و شیشه با استفاده از روش المان محدود در قالب نرم‌افزار انسیس ورک بنچ تحلیل گردیده و مورد مقایسه قرار گرفت. در راستای تحلیل رفتار این مواد پارامترهایی نظیر تنش و کرنش فون میزس، ماکزیمم تنش و کرنش برشی و انرژی کرنشی نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه بررسی گردید. نمونه فولادی با تحمل مقدار ۲۳۸۱۵ مگاپاسکال دارای بیشترین تنش فون میزس و نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن با تحمل ۴۷۶۳ مگاپاسکال دارای کمترین مقدار تنش فون

میزس بود. بیشترین مقدار کرنش فون میزس در نمونه کامپوزیت الیاف کربن در مقایسه با سایر نمونه‌های فلزی و کامپوزیتی مشاهده شد. این مقدار ۸ برابر نمونه آلومینیوم است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد از میان نمونه‌های مدل‌سازی شده نمونه با جنس فولادی علیرغم وزن بالا با بیشترین مقادیر تنش فون میزس و تنش برشی دارای بهترین عملکرد می‌باشد. از سوی دیگر مقادیر بسیار پایین کرنش فون میزس و کرنش ماکزیمم تأییدکننده عملکرد عالی این مواد در مواجهه با بارهای ضربه‌ای است. در مورد نمونه‌های کامپوزیتی می‌توان گفت که نمونه تقویت‌شده با الیاف شیشه به دلیل خاصیت بالای جذب انرژی الیاف شیشه در مقایسه با الیاف کربن و مقاومت بین لایه‌ای بهتر این نوع از کامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف کربنی دارای رفتار ضربه با سرعت پایین بهتری می‌باشند.

References

- [1] Sergolle M, Castel X, Himdi M, Besnier P, Parneix P. Structural composite laminate materials with low dielectric loss: Theoretical model towards dielectric characterization. *Composites Part C: Open Access*. 2020 Nov 1; 3:100050. doi: [10.1016/j.jcomc.2020.100050](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100050)
- [2] Abdollahiparsa H, Shahmirzaloo A, Teuffel P, Blok R. A review of recent developments in structural applications of natural fiber-Reinforced composites (NFRCS). *Composites and Advanced Materials*. 2023 Dec 19; 32:26349833221147540. doi: [10.1177/26349833221147540](https://doi.org/10.1177/26349833221147540)
- [3] Moslemi-Abyaneh B, Ghasemi AR. Investigation of thermal fatigue effects on crack propagation and mode I delamination of multilayer laminated composites using digital image correlation. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2022 Apr 21;8(3):1652-43. doi: [10.22068/JSTC.2022.542167.1755](https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.542167.1755) [In Persian]
- [4] Zhang H, Wu Y, Wang K, Peng Y, Wang D, Yao S, Wang J. Materials selection of 3D-printed continuous carbon fiber reinforced composites considering multiple criteria. *Materials & Design*. 2020 Nov 1; 196:109140. doi: [10.1016/j.matdes.2020.109140](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109140)
- [5] Rad CV, Kodagali K, Roark J, Revilock D, Ruggeri C, Harik R, Sockalingam S. High velocity impact response of hybridized pseudo-woven carbon fiber composite architectures. *Composites Part B: Engineering*. 2020 Dec 15; 203:108478. doi: [10.1016/j.compositesb.2020.108478](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108478)
- [6] Patil S, Reddy DM. Impact damage assessment in carbon fiber reinforced composite using vibration-based new damage index and ultrasonic C-scanning method. *InStructures* 2020 Dec 1 (Vol. 28, pp. 638-650). Elsevier. doi: [10.1016/j.istruc.2020.09.011](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.011)
- [7] Mousavi MV, Khoramishad H. The effect of hybridization on high-velocity impact response of carbon fiber-reinforced polymer composites using finite element modeling, Taguchi method and artificial neural network. *Aerospace Science and Technology*. 2019 Nov 1; 94:105393. doi: [10.1016/j.ast.2019.105393](https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105393)
- [8] Asad M, Dhanasekar M, Zahra T, Thambiratnam D. Impact mitigation of masonry walls with carbon fibre and Auxetic fibre composite renders–A numerical study. *InStructures* 2020 Dec 1 (Vol. 28, pp. 2733-2751). Elsevier. doi: [10.1016/j.istruc.2020.09.047](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.047)
- [9] Liu H, Liu J, Ding Y, Zheng J, Luo L, Kong X, Zhou J, Blackman BR, Kinloch AJ, Dear JP. Modelling the effect of projectile hardness on the impact response of a woven carbon-fibre reinforced thermoplastic-matrix composite. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2020 Dec 1;3(4):403-15. doi: [10.1016/j.ijlmm.2020.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.05.005)
- [10] Hosseini M. Analytical and Numerical study of composite plates under impact loading at low velocity with different strikers. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Apr 10;18(2):53-60. doi: [20.1001.1.10275940.1397.18.2.25.4](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1397.18.2.25.4) [In Persian]
- [11] He B, Wang B, Wang Z, Qi S, Tian G, Wu D. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon fiber and high-strength and high-modulus polyimide fiber. *Polymer*. 2020 Sep 9; 204:122830. doi: [10.1016/j.polymer.2020.122830](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122830)
- [12] Hosur MV, Adbullah M, Jeelani S. Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites. *Composite Structures*. 2005 Mar 1;67(3):253-62. doi: [10.1016/j.compstruct.2004.07.024](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.07.024)
- [13] Symons DD. Characterisation of indentation damage in 0/90 lay-up T300/914 CFRP. *Composites science and technology*. 2000 Feb 1;60(3):391-401. doi: [10.1016/S0266-3538\(99\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00139-6)
- [14] Sadasivam B, Mallick PK. Impact damage resistance of random fiber reinforced automotive composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2002 May; 15(3): 181-91. doi: [10.1177/0892705702015003438](https://doi.org/10.1177/0892705702015003438)
- [15] Azimpour-Shishevan F, Mohtadi-Bonab MA, Akbulut H, Rahmatinejad B. Low velocity impact behavior of twill basalt/epoxy composites modified by graphene nanoparticles. *Journal of Composite Materials*. 2023 Apr;57(8):1379-94. doi: [10.1177/00219983231154484](https://doi.org/10.1177/00219983231154484)

- [16] Sayer M, Bektaş NB, Sayman O. An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates. *Composite Structures*. 2010 Apr 1;92(5):1256-62. doi: [10.1016/j.compstruct.2009.10.036](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.036)
- [17] Wang SX, Wu LZ, Ma L. Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates. *Materials & Design*. 2010 Jan 1;31(1):118-25. doi: [10.1016/j.matdes.2009.07.003](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.003)
- [18] Hülagü B, Ünal HY, Acar V, Khan T, Aydın MR, Aydın OA, Gök S, Pekbey Y, Akbulut H. Low-velocity impact and bending response of graphene nanoparticle-reinforced adhesively bonded double strap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2021 Nov 17;35(22):2391-409. doi: [10.1080/01694243.2021.1885924](https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1885924)
- [19] Azimpour-Shishevan F, Mohtadi-Bonab MA, Rahmatinejad B. The effects of graphene oxide addition on low velocity impact performance of aramid fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*.:e54832. doi: [10.1002/app.54832](https://doi.org/10.1002/app.54832)
- [20] Žmindák M, Novák P, Soukup J, Kaco M. Dynamic simulation of composite layered plates reinforced by unidirectional fibers subjected low velocity impact. In *MATEC Web of Conferences 2020 (Vol. 313)*. EDP Sciences; 2020. doi: [10.1051/mateconf/202031300025](https://doi.org/10.1051/mateconf/202031300025)
- [21] Wriggers P. *Computational contact mechanics*. Laursen TA, editor. Berlin: Springer; 2006 Oct 6. doi: [10.1007/978-3-540-32609-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32609-0)
- [22] Azimpour-Shishevan F, Akbulut H, Mohtadi-Bonab MA. The effect of thermal shock cycling on low velocity impact behavior of carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2019 Jun 15; 5:161-9. doi: [10.1007/s40870-019-00195-x](https://doi.org/10.1007/s40870-019-00195-x)