

بررسی تاثیرات جهت گیری الیاف و هندسه مقطع بر ظرفیت جاذب های کامپوزیتی کربن/اپوکسی

چکیده: در این مقاله، یک مطالعه عددی روی فروریزش و جذب انرژی جاذب هایی کامپوزیتی کربن/اپوکسی با مقاطع هندسی مختلف شامل دایره، مربع و هشت ضلعی در جهت گیری های صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه الیاف با استفاده از نرم افزار آباکوس صورت می گیرد. به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از صحت شبیه سازی انجام شده نتایج حاصل از این شبیه سازی ها با نتایج تجربی محققان پیشین مقایسه می شود. نتایج نشان می دهد که جهت گیری غیر صفر درجه الیاف باعث ایجاد پیچش، تغییر توزیع تنش و افت پایداری هندسی می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که مقطع دایره شکل از بین مقاطع معرفی شده، دارای بالاترین ظرفیت جذب انرژی است. نتایج نشان می دهد که جهت گیری الیاف به طور مستقیم در نحوه فروریزش پوسته های کامپوزیتی اثر گذار است. رفتار جاذب در جهت گیری صفر درجه الیاف مشابه رفتار مواد نرم (همراه با لهیدگی و چین خوردگی) می باشد. در جهت گیری ۹۰ درجه، الیاف هم راستا با محور پوسته کامپوزیتی هستند و فروریزش شباهت بیشتری به رفتار مواد ترد (خردشدگی و شکست) پیدا می کند.

واژه های راهنما: جاذب کامپوزیتی، کامپوزیت کربن/اپوکسی، جهت گیری الیاف، شبیه سازی آباکوس، فروریزش

محمدجواد

محمودی*

دانشیار،
دانشکده مهندسی عمران،
آب و محیط زیست،
دانشگاه شهید بهشتی،
تهران

عباس رهی

استادیار،
دانشکده مهندسی مکانیک و
انرژی،
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

MohammadJavad
Mahmoudi*

Associate Professor,
Faculty of Civil, Water
and Environmental
Engineering, Shahid
Beheshti University,
Tehran

Abbas Rahi

Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
and Energy Engineering
Shahid Beheshti
University, Tehran

The effects of fiber orientation and section geometry on the capacity of carbon/epoxy composite absorbers

Abstract: In this paper, a numerical study on the collapse and energy absorption of carbon/epoxy composite absorbers with different geometrical cross sections, including circle, square and octagonal in the fiber orientations of zero, 30, 45, 60 and 90 degrees is conducted using Abaqus software. In order to validate and ensure the accuracy of the simulation, the results of these simulations are compared with the experimental results of previous researchers. The results reveal that the non-zero degree orientation of the fibers causes twisting, changes in the stress distribution and loss of geometric stability. Also, the results show that the circular section has the highest energy absorption capacity among the introduced sections. The results show that the fiber orientation is directly effective in the collapse of composite shells. The behavior of the absorber in the zero degree orientation of fibers is similar to the behavior of ductile materials (along with crushing and wrinkling). In the 90 degree orientation of fibers, the fibers are aligned with the axis of the composite shell and the collapse becomes more similar to the behavior of brittle materials (crushing and fracture).

Keywords: Composite absorber, Carbon/epoxy composite, Fiber orientation, Abaqus simulation, Collapse

۱- مقدمه

ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالا روی اهداف کامپوزیتی کربن/اپوکسی را داشت، پرداختند. میلی و نسیب [۱۵] به بررسی اثر لایه چینی بر روی رفتار کامپوزیت شیشه/اپوکسی در سه لایه چینی متفاوت پرداختند.

جانسون [۱۶] اثر شکل هندسی بر میزان آسیب روی رفتار کامپوزیت را بررسی کردند. اسکوپنر و ابریت [۱۷] به بررسی نیروی آستانه شروع تورق در ضربه با سرعت کم پرداختند. آنها با بررسی حدود ۵۰۰ نمودار نیروی برخورد بر حسب زمان، دریافتند که زمانی تورق رخ خواهد داد که نمودار نیرو بر حسب زمان دچار یک افت ناگهانی گردد. تسار تساریس و همکاران [۱۸] مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز تحت اثر ضربه سرعت پایین را بررسی کردند. آنها توانستند طراحی بهینه‌ای را برای مقاومت به ضربه کاربردهای هوافضا ارائه کنند. همچنین نشان دادند که کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز قادر به جذب انرژی از طریق تغییر شکل پلاستیک و شکست بین سطح مشترک لایه‌ها هستند. ایسرار و همکاران [۱۹] آزمایشات مختلفی بر روی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف یک طرفه و کامپوزیت بافته شده انجام دادند. آنها تحقیقات خود را روی نحوه فروریزش تحت بارگذاری شبه استاتیکی متمرکز کردند. همچنین کیم و همکاران [۲۰] رفتار برخورد پوسته‌های با مقطع دایره‌ای تقویت شده با انواع مختلف فیبرها را مورد مطالعه قرار دادند.

با دقت در تحقیقات پیشین مقایسه و تأثیر جهت‌گیری الیاف در مقطع‌های دایره، مربع و هشت‌ضلعی بر نحوه فروریزش جاذب‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی مورد توجه ویژه قرار نگرفته است. در این مقاله به بررسی تأثیر جهت‌گیری الیاف برای مقطع دایره، مربع و هشت‌ضلعی پرداخته می‌شود و مقدار انرژی جذب شده، نیروی اولیه فروریزش و متوسط نیروی فروریزش برای حالت‌های مختلف استخراج می‌شود. تغییر در جهت‌گیری الیاف منجر به تغییر در استحکام جاذب و پیچش در جهت الیاف می‌شود که هر کدام به نوبه خود تأثیر قابل توجهی در نحوه فروریزش، نیروی اولیه و انرژی جذب شده دارد.

۲- تحلیل

در این تحقیق، به مطالعه عددی رفتار فروریزش و جذب انرژی پوسته کامپوزیتی از جنس کربن/اپوکسی تحت بارگذاری محوری پرداخته می‌شود. فرآیند فروریزش با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی می‌شود و تأثیر جهت‌گیری‌های مختلف الیاف شامل زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه

ضربه ناشی از برخورد سازه‌های متحرک به اجسام دیگر موجب تخریب برخی از تجهیزات آن‌ها می‌شود و لذا نیاز به روشی برای جذب انرژی و کاهش شتاب برخورد است [۱]، [۲]، [۳]. مطالعات گسترده‌ای برای ارزیابی ویژگی‌های جذب انرژی در لوله‌های کامپوزیتی انجام شده است [۴]، [۵]، [۶]. آلیا و همکاران [۷] مشخصات جاذب انرژی سازه‌های فومی که با لوله‌های کربنی تقویت شده‌اند را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که کامپوزیت‌های لوله‌ای با افزایش دانسیته فوم، جذب انرژی بیشتری دارند. همچنین مشخصات جذب انرژی با کاهش نسبت قطر داخلی به ضخامت افزایش می‌یابد. مامالیس و همکاران [۸] گزارش در خصوص پوسته‌های مخروطی گزارش کردند که انرژی جذب شده ویژه با افزایش زاویه نیم رأس مخروط ناقص، کاهش می‌یابد. پوسته‌های مخروطی نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای در جذب انرژی مناسب‌تر هستند که این مسأله به خاطر منحنی نیرو - جابجایی مناسب آن‌ها در ضربه می‌باشد. به علاوه مخروطی بودن این پوسته‌ها احتمال شکست ناشی از کمناش کلی را کاهش می‌دهد. کمناش کلی به دلایل جذب نامناسب انرژی یک تغییر شکل نامطلوب است و اجتناب از آن بسیار مهم است. دیوید و همکاران [۹] هندسه‌های مختلف مانند دایره، مربع، شش‌ضلعی و مخروطی را برای کامپوزیت شیشه/پلی‌استر مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. آنها همچنین جهت بهینه‌سازی میزان جذب انرژی، توان جذب انرژی را بررسی کردند. الخطیب و همکاران [۱۰] به بررسی اثر جهت‌گیری الیاف شیشه در مواد کامپوزیت شیشه/اپوکسی پرداختند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که جهت‌گیری ۱۵ و ۷۵ درجه الیاف شیشه حالت بهینه است و توان جذب انرژی بیشترین مقدار را دارا است.

چن و همکاران [۱۱] با بررسی دو رزین مختلف، رزین وینیل استر و پلی استر مشاهده کردند که در رزین وینیل استر مقدار جذب انرژی ۳۳٪ افزایش خواهد یافت. البته یکسری از شرایط طی تحقیق آنها، یکسان در نظر گرفته شد. به عنوان مثال درجه حرارت در مرحله پخت رزین‌ها یکسان بود. بارانت و همکاران [۱۲] کاربرد کامپوزیت‌ها در جذب انرژی‌های ناشی از ضربه را در طول شکست بررسی کردند. آنها نشان دادند که برای المان‌هایی که با فوم پر شده‌اند جذب انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد. بران و همکاران [۱۳] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، پاسخ به ضربه در تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با هسته لانه زنبوری تحت برخورد سرعت پایین را بررسی کردند. پرناز-سانچز و همکاران [۱۴] به توسعه روش عددی که قدرت پیش‌بینی آسیب

که در آن F_f^t استحکام کششی الیاف، F_f^c استحکام فشاری الیاف، F_m^t استحکام کششی زمینه، F_m^c استحکام فشاری زمینه، X^T استحکام کششی طولی کامپوزیت، X^C استحکام فشاری طولی کامپوزیت، Y^T استحکام کششی عرضی کامپوزیت، Y^C استحکام فشاری عرضی کامپوزیت، S^L استحکام برشی طولی کامپوزیت و S^T استحکام برشی عرضی کامپوزیت هستند. همچنین، $\bar{\sigma}_{11}$ ، $\bar{\sigma}_{22}$ و $\bar{\tau}_{12}$ به ترتیب مولفه‌های تانسور تنش می‌باشند. شروع آسیب در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک جهته به صورت تنش صفحه‌ای ارزیابی می‌شود. معیار رشد آسیب در لایه‌های کامپوزیتی در این مدل سازی بر مبنای انرژی است و نرخ اتلاف انرژی حین فرآیند آسیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{D} = Y_{ft} \dot{d}_{ft} + Y_{fc} \dot{d}_{fc} + Y_{mt} \dot{d}_{mt} + Y_{mc} \dot{d}_{mc} \quad (2)$$

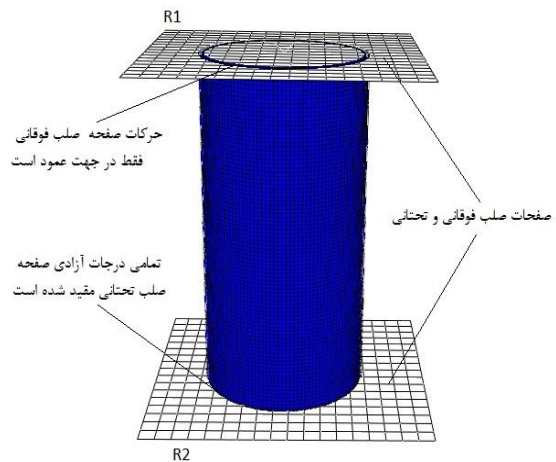
که در آن Y_{ft} ، Y_{fc} ، Y_{mt} و Y_{mc} به ترتیب ضریب نرخ اتلاف انرژی مربوط به مدهای خرابی متفاوت را نشان می‌دهد. زمانی که معیار شروع آسیب ارضاء شود، بارگذاری بیشتر باعث کاهش ضرایب سفتی ماده می‌شود. کاهش ضرایب سفتی ماده نیز با متغیرهای آسیب کنترل می‌شوند که مقادیری بین صفر (حالت بدون آسیب) و یک (حالت آسیب کامل) دارند. قانون تکامل متغیر آسیب در فاز پس از شروع آسیب است و بر پایه انرژی شکست تلف شده در حین فرآیند آسیب تعیین می‌شود. تغییر هر متغیر آسیب توسط جابجایی‌های معادل برای هر مود تخریب در جدول (۱) آمده است. L_c بیانگر طول مشخصه است. انرژی شکست باید برای هر مود تخریب تعیین شوند.

جدول ۱ متغیر آسیب جابجایی‌های معادل برای هر مود خرابی

مود خرابی	δ_{eq}	σ_{eq}
کشش الیاف ($\bar{\sigma}_{11} \geq 0$)	$L_c \sqrt{(\varepsilon_{11})^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2}$	$\frac{L_c((\sigma_{11})\langle \varepsilon_{11} \rangle + \alpha \sigma_{12} \varepsilon_{12})}{\delta_{1,eq}^{ft}}$
فشار الیاف ($\bar{\sigma}_{11} \leq 0$)	$L_c \langle -\varepsilon_{11} \rangle$	$\frac{L_c \langle -\sigma_{11} \rangle \langle -\varepsilon_{11} \rangle}{\delta_{1,eq}^{fc}}$
کشش زمینه ($\bar{\sigma}_{22} \geq 0$)	$L_c \sqrt{(\varepsilon_{22})^2 + \varepsilon_{12}^2}$	$\frac{L_c((\sigma_{22})\langle \varepsilon_{22} \rangle + \sigma_{12} \varepsilon_{12})}{\delta_{eq}^{mt}}$
فشار زمینه ($\bar{\sigma}_{22} \leq 0$)	$L_c \sqrt{(\varepsilon_{22})^2 + \varepsilon_{12}^2}$	$\frac{L_c \langle -\sigma_{22} \rangle \langle -\varepsilon_{22} \rangle + \sigma_{12} \varepsilon_{12}}{\delta_{eq}^{mc}}$

جدول (۲) خواص مکانیکی مربوط به کامپوزیت استفاده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

نسبت به محور پوسته در مقاطع مختلف هندسی شامل دایره، مربع و هشت‌ضلعی بر مقدار انرژی جذب شده، نیروی اولیه فروریزش و متوسط نیروی فروریزش بررسی و با هم مقایسه می‌شود. مدل شبیه‌سازی شده بین دو صفحه مسطح R1 و R2 قرار می‌گیرد که در مقایسه با پوسته کامپوزیتی صلب هستند. نوع المان‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی پوسته استوانه‌ای جدارنازک و صفحات صلب، به ترتیب المان‌های پوسته‌ای چهارگوش (S4R) و المان صلب (R3D4) می‌باشد. طی تحلیل حساسیت به مش که متعاقباً آورده می‌شود، طول ضلع المان مورد استفاده در شبیه‌سازی پوسته استوانه‌ای برابر ۰/۶ میلی‌متر اتخاذ می‌شود. صفحه صلب R1 دارای سرعت اولیه ۱/۵ متر بر ثانیه و وزن ۵۰ گرم است و صفحه صلب R2 به صورت ثابت مقید است. شکل (۱) طرح‌واره مدل سازی انجام شده برای یک پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۱ نحوه شبیه‌سازی پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای

از معیار هاشین برای پیش‌بینی شروع آسیب استفاده می‌شود و قانون رشد آسیب بر پایه انرژی آزاد شده در طول فرآیند آسیب می‌باشد. معیار هاشین چهار مکانیزم متفاوت شروع آسیب را مطابق با روابط زیر در نظر می‌گیرد.

$$F_f^t = \left(\frac{\bar{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\bar{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2$$

$$F_f^c = \left(\frac{\bar{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2$$

$$F_m^t = \left(\frac{\bar{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\bar{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2$$

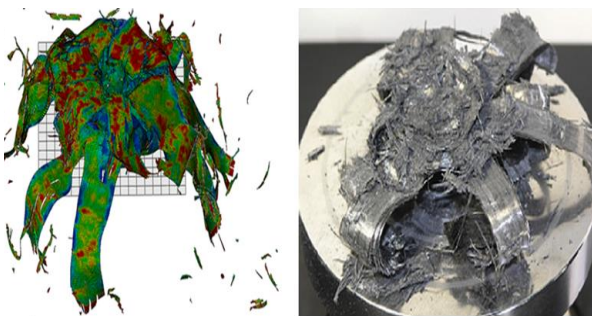
$$F_m^c = \left(\frac{\bar{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\bar{\sigma}_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\bar{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2 \quad (1)$$

جنس کامپوزیت کربن/اپوکسی با آرایش لایه چینی [90/0]₇ بوده که مشخصات هندسی آن طبق در جدول (۳) آورده شده است. که همین مقادیر در مدل برای صحت‌سنجی اعمال شده است.

جدول ۳ مشخصات هندسی نمونه استوانه‌ای مرجع [۲۰] به میلی‌متر

ارتفاع استوانه	قطر قاعده استوانه	ضخامت هر لایه
۱۰۰	۳۰	۰/۱۳

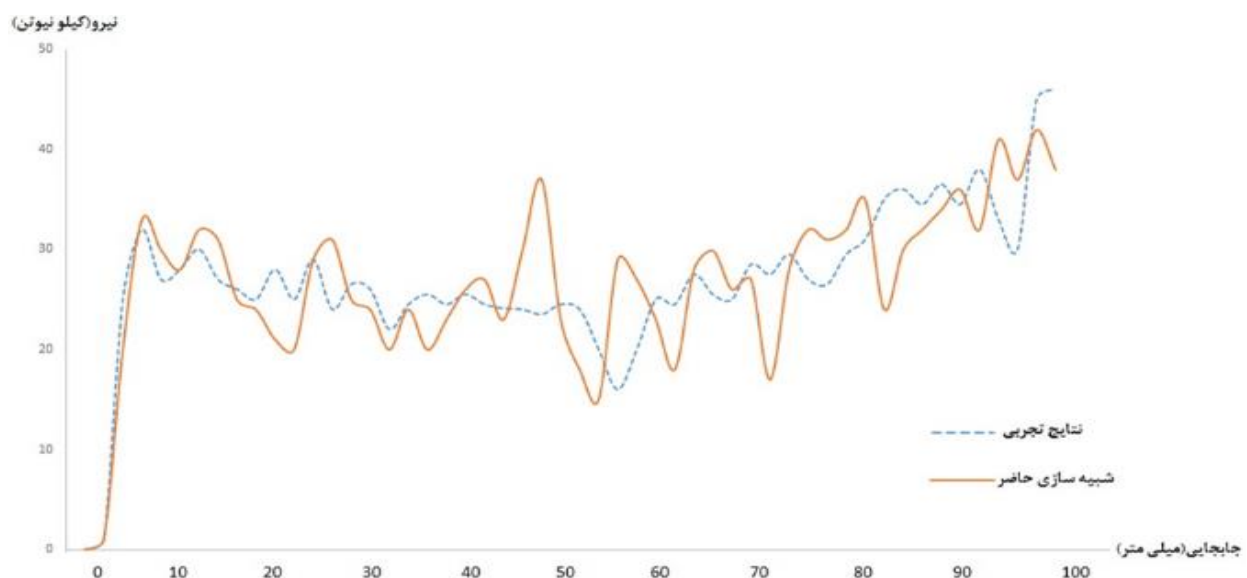
شکل (۲) مقایسه بین فروریزش واقعی (تجربی) [۲۰] و فروریزش شبیه‌سازی ارائه شده پوسته استوانه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲ مقایسه نتایج تجربی [۲۰] (سمت راست) و شبیه‌سازی حاضر (سمت چپ) فروریزش پوسته استوانه‌ای

همانطور که مشاهده می‌شود، پارگی لایه‌ها و نحوه فروریزش مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۰] از تطابق قابل قبولی برخوردار است.

همچنین مقایسه بین نمودار نیرو-تغییر مکان فروریزش نمونه جاذب آزمایشگاهی مرجع [۲۰] و شبیه‌سازی حاضر در شکل (۳) ارائه شده است.



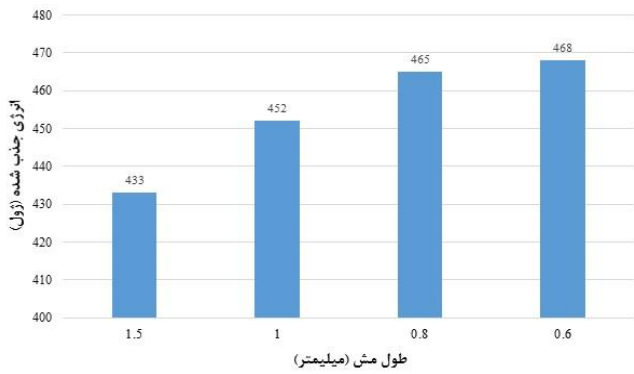
شکل ۳ مقایسه بین نمودار نیرو - تغییر مکان فروریزش نمونه جاذب آزمایشگاهی مرجع [۲۰] و شبیه‌سازی حاضر

جدول ۲ خواص مکانیکی کامپوزیت کربن/اپوکسی مورد بررسی

نام پارامتر	نماد	واحد	مقدار
چگالی	ρ	gr/mm ²	۰/۰۰۱۵
ضریب الاستیسیته در جهت الیاف	E_{11}	MPa	۱۳۸۵۸۴/۶
ضریب الاستیسیته عمود بر الیاف	E_{22}	MPa	۱۰۰۶۶/۳
ضریب الاستیسیته عمود بر الیاف	E_{33}	MPa	۱۰۰۶۶/۳
ضریب پواسون (صفحه ۱-۲)	ν_{12}	-	۰/۲۶
ضریب پواسون (صفحه ۱-۳)	ν_{13}	-	۰/۴۱
ضریب پواسون (صفحه ۲-۳)	ν_{23}	-	۰/۲۶
مدول برشی (صفحه ۱-۲)	G_{12}	MPa	۲۹۵۰/۶
مدول برشی (صفحه ۱-۳)	G_{13}	MPa	۲۹۵۰/۹
مدول برشی (صفحه ۲-۳)	G_{23}	MPa	۵۰۲۹/۶
استحکام کششی در جهت الیاف	X^T	MPa	۱۰۲۴/۲
استحکام فشاری در جهت الیاف	X^C	MPa	۶۹۸/۴
استحکام کششی عمود بر الیاف	Y^T	MPa	۴۱/۳
استحکام فشاری عمود بر الیاف	Y^C	MPa	۱۱۷/۲
استحکام برشی نهایی طولی	S^L	MPa	۶۸
استحکام برشی نهایی عرضی	S^T	MPa	۶۸
انرژی شکست کششی در جهت الیاف	G_{1+}^C	kJ/m ²	۱۲۵
انرژی شکست فشاری در جهت الیاف	G_{1-}^C	kJ/m ²	۲۵۰
انرژی شکست کششی عمود بر الیاف	G_{2+}^C	kJ/m ²	۹۵
انرژی شکست فشاری عمود بر الیاف	G_{2-}^C	kJ/m ²	۲۴۵

۳- نتایج و بحث

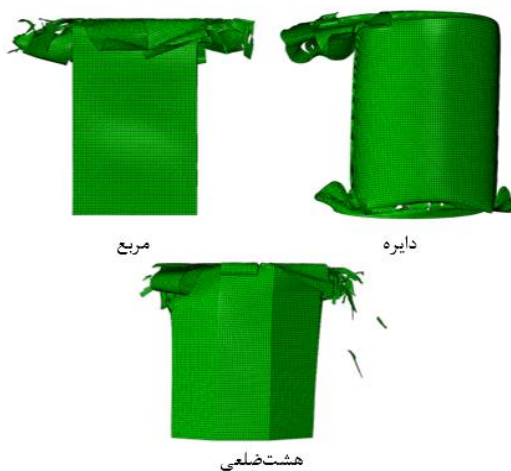
به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از صحت شبیه‌سازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی مرجع [۲۰] مقایسه می‌شود. در مطالعه آزمایشگاهی مرجع [۲۰] پوسته استوانه‌ای از



شکل ۴ انرژی جذب شده برای اندازه‌های مختلف در پوسته

همانطور که در جدول (۵) و شکل (۴) ملاحظه می‌شود، وقتی طول مش کاهش می‌یابد، مقدار انرژی جذب شده همگرا می‌شود. با کاهش طول مش از ۱/۵ میلیمتر به ۱ میلیمتر، مقدار انرژی جذب شده ۱۹ ژول افزایش می‌یابد. برای طول‌های کوتاه‌تر از ۱ میلیمتر مقدار انرژی جذب شده همگرا می‌شود. با کاهش طول مش به ۰/۸ میلیمتر مقدار انرژی جذب شده ۱۳ ژول افزایش پیدا می‌کند و برای طول کوتاه‌تر، تغییرات انرژی جذب شده به مقدار ناچیزی خواهد بود. اختلاف انرژی جذب شده برای مش‌های به طول ۰/۶ میلیمتر ۳ ژول است. درصد خطای مش‌بندی برای مش‌های به طول ۰/۶ میلیمتر به زیر ۱ درصد می‌رسد و از آنجایی که در مش‌بندی‌های ریزتر حجم محاسبات به شدت افزایش یافته و زمان انجام محاسبات هم به نسبت افزایش می‌یابد، لذا ابعاد مش‌بندی برای تمام مدل‌ها به طول ۰/۶ میلیمتر انتخاب شده است.

شکل (۵) فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی در جهت‌گیری‌های صفر درجه الیاف و در هندسه‌های مختلف مقطع دایروی، مربعی و هشت‌ضلعی را نشان می‌دهد.



شکل ۵ فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی در جهت‌گیری صفر درجه الیاف و هندسه‌های مقطع دایروی، مربعی و هشت‌ضلعی

همانطور که ملاحظه می‌شود، روند تغییرات نیروی نمونه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حاضر مشابه است. بنابراین می‌توان دریافت که نتایج تجربی و شبیه‌سازی فروریزش محوری پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تحت اثر بارگذاری محوری به یکدیگر نزدیک است.

به‌منظور مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی حاضر و مطالعه تجربی مرجع [۲۰]، نتایج خروجی شامل نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده برای لهیدگی نمونه در ۷۵ درصد طول اولیه در جدول (۴) نشان داده شده است. میزان درصد خطا بین شبیه‌سازی حاضر و تست تجربی برای انرژی جذب شده، نیروی فروریزش و اولین بیشینه نیرو، به ترتیب ۶/۵، ۱۱/۵ و ۹/۲ درصد می‌باشد.

جدول ۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مطالعه تجربی [۲۰]

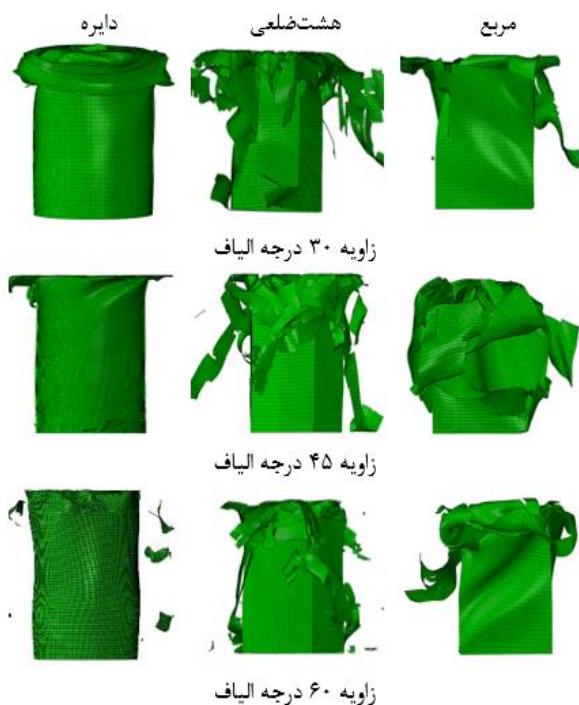
نتایج	اولین بیشینه نیرو (kN)	انرژی جذب شده (J)	نیروی متوسط فروریزش (kN)
آزمایشگاهی	۳۱/۳	۲۰۵۷/۴	۲۵/۲
شبیه‌سازی	۳۴/۲	۲۱۹/۶۵	۲۸/۱
درصد خطا	۹/۲	۶/۵	۱۱/۵

چنانچه از شکل‌های (۲) و (۳) و جدول (۴) مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد. لذا از مدلسازی انجام شده در نرم افزار آباکوس می‌توان برای استخراج و پیش‌بینی رفتار سیستم در سایر حالت‌ها استفاده کرد. در اینجا، یک تحلیل حساسیت به مش به‌منظور بررسی همگرایی مدل و عدم وابستگی نتایج حل مسئله روی انرژی جذب شده به اندازه‌های مش‌های انتخاب شده انجام می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد، نوع مش انتخاب شده برای پوسته استوانه‌ای از نوع S4R می‌باشد. مقدار انرژی جذب شده برای طول ضلع‌های مختلف مش شامل ۱/۵، ۱، ۰/۸ و ۰/۶ میلیمتر در پوسته استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵ انرژی جذب شده برای طول‌های مختلف در پوسته

طول مش (mm)	۱/۵	۱	۰/۸	۰/۶
انرژی جذب شده (J)	۴۳۳	۴۵۲	۴۶۵	۴۶۸

شکل (۴) نیز مقدار انرژی جذب شده برای طول‌های مختلف در پوسته استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۷ فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی در زاویه ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه الیاف

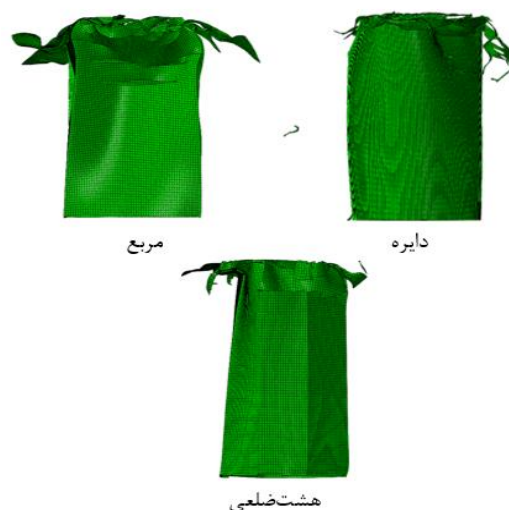
در خصوص اثر مقاطع مختلف هندسی در نحوه فروریزش و انرژی جذب شده در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) مشاهده می‌شود که پایداری و مقاومت هندسی متأثر از شکل هندسی است. سطح مقطع مربع نسبت به دایره و هشت‌ضلعی دارای بیشترین پایداری هندسی است لذا در سطح مقطع مربع، برای همه جهت‌گیری‌های الیاف نیروی اولیه فروریزش نسبت به سایر مقاطع بیشتر است. وجود گوشه‌های تیز در مقاطع مربعی و هشت‌ضلعی سبب افزایش تمرکز تنش در این نقاط خواهد شد. افزایش تنش در گوشه‌های تیز، مقاومت پوسته کامپوزیتی را در مقابل فروریزش کاهش می‌دهد لذا اگرچه نیروی اولیه فروریزش در این مقاطع به دلیل پایداری هندسی بالا، نسبت به مقطع دایره‌ای بیشتر است اما متوسط نیروی فروریزش و متأثر از آن انرژی جذب شده در مقطع دایره‌ای در جهت‌گیری ۴۵ درجه الیاف نسبت به مدل‌های دیگر بالاترین کارکرد را دارد.

شکل (۸) مقدار نیروی اولیه منجر به فروریزش را برای جذب با مقطع مربعی در زوایای الیاف مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل (۸) ملاحظه می‌شود، مقدار میانگین نیروی اولیه فروریزش در جهت‌گیری صفر درجه الیاف $1/8$ کیلونیوتن است. جهت‌گیری ۳۰ درجه نسبت به راستای افق برای الیاف، میانگین نیروی اولیه فروریزش را ۱۳۰ نیوتن کاهش می‌دهد. با افزایش جهت‌گیری الیاف در زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰

همان‌طور که از شکل (۵) مشاهده می‌شود، رفتار جاذب در جهت‌گیری صفر درجه الیاف مشابه رفتار مواد نرم می‌باشد. زمانی که زاویه الیاف صفر درجه است، فروریزش همراه با چین خوردگی و پارگی از نقاط پرتنش رخ خواهد داد. در این حالت رفتار پوسته حین فروریزش بیشتر متأثر از زمینه کامپوزیت (اپوکسی) است و از آنجایی که زمینه کامپوزیت یا به اصطلاح ماتریس از دسته مواد نرم است، نحوه فروریزش مشابه مواد نرم همراه با چین خوردگی و لهیدگی خواهد بود.

شکل (۶) رفتار فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی در جهت‌گیری‌های ۹۰ درجه الیاف در هندسه‌های مختلف مقطع دایروی، مربعی و هشت‌ضلعی را نشان می‌دهد.



شکل ۶ فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی در جهت‌گیری ۹۰ درجه الیاف در هندسه‌های مقطع دایروی، مربعی و هشت‌ضلعی

از شکل (۶) مشاهده می‌شود که در جهت‌گیری ۹۰ درجه، الیاف همراستا با محور پوسته کامپوزیتی هستند و در این حالت می‌توان گفت که عمل فروریزش غالباً متأثر از رفتار الیاف است به طوری که هرچقدر به زاویه ۹۰ درجه نزدیک می‌شویم، فروریزش شباهت بیشتری به مواد ترد پیدا می‌کند.

شکل (۷) فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی در جهت‌گیری‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه الیاف و در هندسه‌های مختلف مقطع دایروی، مربعی و هشت‌ضلعی را نشان می‌دهد.

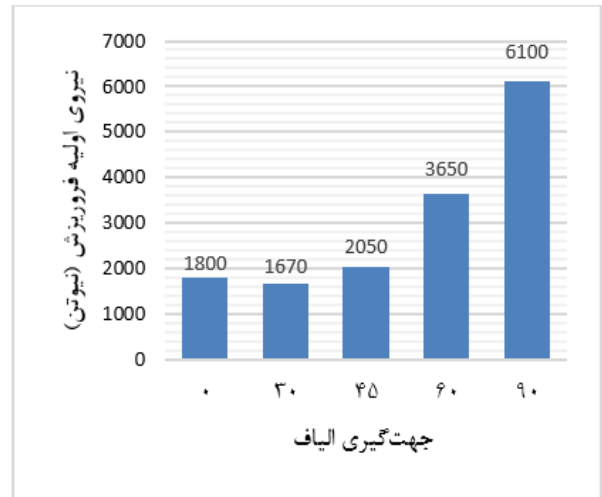
از مقایسه جهت‌گیری‌های الیاف مشاهده می‌شود که جهت‌گیری غیر از صفر یا نود درجه الیاف باعث ایجاد پیچش در جاذب می‌شوند لذا توزیع تنش در محیط پوسته تغییر می‌کند به طوری که تنش در گوشه‌های تیز موجود در مقطع مربعی و هشت‌ضلعی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن پیچش ایجاد شده در نمونه سبب افت پایداری هندسی در پوسته کامپوزیتی می‌شود.

میانگین انرژی جذب شده افزایش می‌یابد به طوری که در جهت‌گیری ۹۰ درجه تا ۵۲۵ ژول افزایش خواهد یافت. همچنین از شکل‌های (۸) و (۹) جمع‌بندی می‌شود که پیش‌پیش در پوسته کامپوزیتی باعث می‌شود پایداری هندسی سازه کاهش پیدا کند. لذا عمل فروریزش با مقاومت کمتری رخ می‌دهد. هنگامی که مقاومت سازه در مقابل فروریزش کاهش یابد، متوسط نیروی فروریزش و متأثر از آن انرژی جذب شده نیز کاهش می‌یابد. اما تغییر در جهت‌گیری الیاف به نحوی که زاویه بین الیاف و محور استوانه کم شود، باعث افزایش استحکام در راستای طول پوسته خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

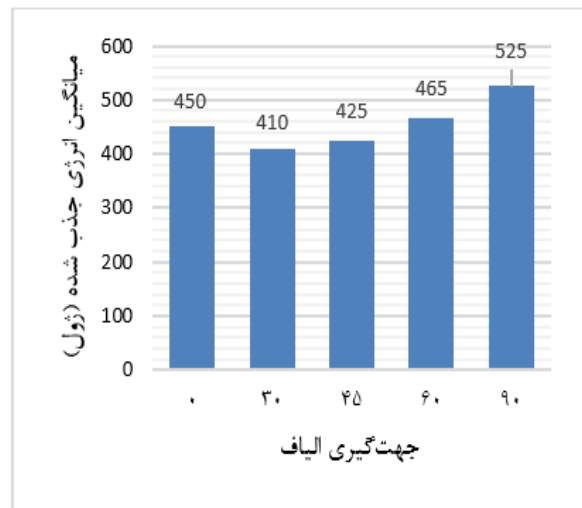
در این تحقیق اثر جهت‌گیری الیاف شامل زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در یک پوسته کامپوزیتی بر رفتار فروریزش، نیروی اولیه و انرژی جذب شده برای مقاطع دایره، مربع و هشت‌ضلعی به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج تجربی پیشین و شبیه‌سازی فروریزش حاضر نشان می‌دهد تطابق خوبی بین نمودارهای نیرو-جابجایی در هر دو حالت وجود دارد که سبب اطمینان از صحت مدل‌سازی ارائه شده برای تحلیل فرآیند فروریزش تحت اثر بار محوری پوسته‌های کامپوزیتی دارد. بنابراین مدل‌های ارائه شده روش مناسبی را برای ارزیابی مهم‌ترین معیارهای مقایسه فروریزش جاذب‌ها شامل بیشینه نیروی اولیه فروریزش، میزان انرژی جذب شده و متوسط نیروی فروریزش در شرایط مختلف فراهم می‌کند. در این پژوهش، اثر جهت‌گیری الیاف در نحوه توزیع تنش، نحوه فروریزش و نیروهای اعمالی به صفحات صلب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در جهت‌گیری الیاف مستقیماً باعث افزایش استحکام فشاری در راستای طولی پوسته کامپوزیتی و کاهش پایداری هندسی پوسته کامپوزیتی به دلیل ایجاد پیش‌پیش می‌شود. افزایش استحکام فشاری سبب افزایش نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده خواهد شد، این در حالی است که کاهش پایداری هندسی پوسته کامپوزیتی سبب کاهش نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده می‌شود. در جهت‌گیری ۳۰ درجه الیاف تأثیر کاهش پایداری هندسی از افزایش استحکام در راستای طولی پوسته کامپوزیتی بیشتر است لذا نیروی اولیه و انرژی جذب شده نسبت به جهت‌گیری صفر درجه الیاف کاهش می‌یابد. تغییر مجدد جهت‌گیری الیاف به ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه،

درجه نسبت به راستای افق، مقدار میانگین نیروی اولیه فروریزش با شیب تندی افزایش می‌یابد به طوری که در جهت‌گیری ۹۰ درجه الیاف مقدار میانگین نیروی اولیه فروریزش به ۶/۱ کیلونیوتن خواهد رسید.



شکل ۸ تغییرات میانگین نیروی اولیه در جهت‌گیری‌های مختلف الیاف

شکل (۹) میانگین انرژی جذب شده جاذب با مقطع مربعی در جهت‌گیری‌های مختلف الیاف را نشان می‌دهد.



شکل ۸ تغییرات انرژی جذب شده در جهت‌گیری‌های مختلف الیاف

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، مقدار میانگین انرژی جذب شده در جهت‌گیری صفر درجه الیاف ۴۵۰ ژول است. در جهت‌گیری ۳۰ درجه الیاف بواسطه کاهش پایداری هندسی میانگین انرژی جذب شده ۴۰ ژول کاهش می‌یابد. با افزایش جهت‌گیری الیاف در زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، مقدار

- با توجه به خواص مکانیکی کامپوزیت، استحکام فشاری در جهت الیاف دارای بیشینه مقدار است. با افزایش زاویه جهت‌گیری الیاف از صفر درجه تا ۹۰ درجه، زاویه بین الیاف و راستای طولی پوسته کم می‌شود، به نحوی که در جهت‌گیری ۹۰ درجه الیاف همراستا خواهند شد. در این حالت پوسته‌های کامپوزیتی بیشترین استحکام فشاری را در راستای طولی خواهند داشت لذا نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده بیشینه مقدار خود را دارا هستند. اگرچه انرژی جذب شده بیشترین مقدار ممکن را داراست اما شوک اولیه اعمالی به سازه ناشی از بالا بودن نیروی اولیه فروریزش نامطلوب است. لذا جهت‌گیری‌های ۶۰ و ۹۰ درجه الیاف انتخاب مناسبی برای ساخت چند لایه کامپوزیتی مورد استفاده در جاذب‌ها نیستند.
- سطح مقطع مربعی نسبت به سایر مقاطع دارای بیشترین پایداری هندسی است. لذا در سطح مقطع مربعی برای همه جهت‌گیری‌های الیاف نیروی اولیه فروریزش نسبت به سایر مقاطع بیشتر است. وجود گوشه‌های تیز در مقاطع مربعی و هشت ضلعی سبب افزایش تمرکز تنش در این نقاط خواهد شد. افزایش تنش در گوشه‌های تیز، مقاومت پوسته کامپوزیتی را در مقابل فروریزش کاهش می‌دهد. اگرچه نیروی اولیه فروریزش در این مقاطع به دلیل پایداری هندسی بالا نسبت به مقطع دایره‌ای بیشتر است اما متوسط نیروی فروریزش و متأثر از آن انرژی جذب شده حین فروریزش کاهش می‌یابد.
- مقطع دایره‌ای در جهت‌گیری ۴۵ درجه الیاف نسبت به مدل‌های دیگر بالاترین کارکرد را دارا است.

باعث می‌شود که استحکام فشاری افزایش بیشتری باید به طوری که در جهت‌گیری ۹۰ درجه الیاف، مقدار استحکام فشاری به مقدار بیشینه خودش می‌رسد. این درحالی است که پیچش در سازه از زاویه ۴۵ درجه به بعد با نزدیک شدن جهت‌گیری الیاف به راستای محوری، کاهش می‌یابد و در نهایت در زاویه ۹۰ درجه الیاف از بین می‌رود. در جهت‌گیری ۹۰ درجه الیاف، نیروی اولیه، بیشینه مقدار را دارد. پس اگرچه انرژی جذب شده از همه حالت‌های قبلی بیشتر است اما از این مهم نباید غافل شد که نیروی اولیه به صورت نامطلوبی افزایش پیدا کرده است.

نتایج مطالعه اثر مقاطع مختلف هندسی پوسته‌های کامپوزیتی و جهت‌گیری‌های مختلف الیاف را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- جهت‌گیری الیاف به طور مستقیم در نحوه فروریزش پوسته‌های کامپوزیتی اثر گذار است. رفتار جاذب در جهت‌گیری صفر درجه الیاف مشابه رفتار مواد نرم (همراه با لهیدگی و چین‌خوردگی) می‌باشد. در جهت‌گیری ۹۰ درجه، الیاف همراستا با محور پوسته کامپوزیتی هستند و فروریزش شباهت بیشتری به رفتار مواد ترد (خردشدگی و شکست) پیدا می‌کند.
- جهت‌گیری غیر از صفر و ۹۰ درجه الیاف باعث ایجاد پیچش در جاذب می‌شود. پیچش ناشی از جهت‌گیری الیاف سبب افت پایداری هندسی می‌شود و توزیع تنش را در محیط پوسته تغییر می‌دهد به طوری که در گوشه‌های تیز موجود در مقطع مربع و هشت‌ضلعی تنش افزایش می‌یابد. لذا نیروی اولیه فروریزش، متوسط نیروی فروریزش و انرژی جذب شده کاهش می‌یابد.

۵ - مراجع

- [1] M. Tauhiduzzaman, I. Hafez, D. Bousfield, and M. Tajvidi, "Multiscale modeling of lignocellulosic foams under compression," *Materials & Design*, vol. 225, p. 111471, 2023/01/01/ 2023. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111471 .
- [2] M. J. Donough, B. G. Prusty, M. J. Van Donselaar, E. V. Morozov, H. Wang, P. J. Hazell, *et al.*, "In-Plane and Oblique Edge-on Impact on Thick Glass-Fibre/Epoxy Composite Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 171, p. 104373, 2023/01/01/ 2023. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104373.
- [3] Ö. Adanur and F. Varol, "Investigation of the effect of friction force on the energy absorption characteristics of thin-walled structures loaded with axial impact force," *Materials Today Communications*, vol. 36, p. 106420, 2023/08/01/ 2023. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.106420.
- [4] R. Jazaei, M. Karakouzian, B. O'Toole, J. Moon, and S. Gharehdaghi, "Energy dissipation capacity of cementitious nanocomposite reinforced by hybrid carbon nanotubes," *Construction and Building Materials*, vol. 323, p. 126396, 2022/03/14/ 2022. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126396.
- [5] N. Karunagaran, G. Bharathiraja, A. Muniappan, and K. Yoganandam, "Energy absorption and damage behaviour of surface treated glass fibre/stainless steel wire mesh reinforced hybrid composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 1078-1084, 2020/01/01/ 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.305.

- [6] B. C. Cihan Yilmaz, E. Binbir, C. Guzelbulut, H. Yildirim, and O. C. Celik, "Circular concrete-filled double skin steel tubes under concentric compression: Tests and FEA parametric study," *Composite Structures*, vol. 309, p. 116765, 2023/04/01/ 2023. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116765.
- [7] R. A. Alia, W. J. Cantwell, G. S. Langdon, S. C. K. Yuen, and G. N. Nurick, "The energy-absorbing characteristics of composite tube-reinforced foam structures," *Composites Part B: Engineering*, vol. 61, pp. 127-135, 2014/05/01/ 2014. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.01.018.
- [8] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, and D. P. Papapostolou, "The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes: Finite element modelling," *Composite Structures*, vol. 74, pp. 213-225, 2006/07/01/ 2006. doi: 10.1016/j.compstruct.2005.04.006.
- [9] M. David and A. F. Johnson, "Effect of strain rate on the failure mechanisms and energy absorption in polymer composite elements under axial loading," *Composite Structures*, vol. 122, pp. 430-439, 2015/04/01/ 2015. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.11.010.
- [10] F. Alkhatib, E. Mahdi, and A. Dean, "Development of composite double-hat energy absorber device subjected to traverser loads," *Composite Structures*, vol. 240, p. 112046, 2020/05/15/ 2020. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112046.
- [11] S. Chen, A. M. Joesbury, F. Yu, L. T. Harper, and N. A. Warrior, "Optimisation of intra-ply stitch removal for improved formability of biaxial non-crimp fabrics," *Composites Part B: Engineering*, vol. 229, p. 109464, 2022/01/15/ 2022. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109464.
- [12] W. Barnat, P. Dziewulski, T. Niezgodna, and R. Panowicz, "Application of composites to impact energy absorption," *Computational Materials Science*, vol. 50, pp. 1233-1237, 2011/02/01/ 2011. doi: 10.1016/j.commatsci.2010.05.030.
- [13] M. Braun, I. Iváñez, and M. P. Ariza, "A numerical study of progressive damage in unidirectional composite materials using a 2D lattice model," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 249, p. 107767, 2021/05/15/ 2021. doi: 10.1016/j.engfracmech.2021.107767.
- [14] J. Pernas-Sánchez, S. M. García-Rodríguez, J. A. Artero-Guerrero, J. López-Puente, and J. Costa, "High velocity impact response of carbon/epoxy composite laminates at cryogenic temperatures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 168, p. 107456, 2023/05/01/ 2023. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107456.
- [15] F. Mili and B. Necib, "Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities," *Composite Structures*, vol. 51, pp. 237-244, 2001/03/01/ 2001. doi: 10.1016/S0263-8223(00)00134-3.
- [16] A. F. Johnson, "Modelling fabric reinforced composites under impact loads," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, pp. 1197-1206, 2001/09/01/ 2001. doi: 10.1016/S1359-835X(00)00186-X.
- [17] G. A. Schoeppner and S. Abrate, "Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, pp. 903-915, 2000/09/01/ 2000. doi: 10.1016/S1359-835X(00)00061-0.
- [18] N. Tsartsaris, M. Meo, F. Dolce, U. Polimeno, M. Guida, and F. Marulo, "Low-velocity impact behavior of fiber metal laminates," *Journal of Composite Materials*, vol. 45, pp. 803-814, 2011/04/01 2011. doi: 10.1177/0021998310376108.
- [19] H. A. Israr, S. Rivallant, and J. J. Barrau, "Experimental investigation on mean crushing stress characterization of carbon-epoxy plies under compressive crushing mode," *Composite Structures*, vol. 96, pp. 357-364, 2013/02/01/ 2013. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.022.
- [20] J.-S. Kim, H.-J. Yoon, and K.-B. Shin, "A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 38, pp. 198-207, 2011/04/01/ 2011. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.11.007.