

بررسی رفتار الیاف کربن و کولار در استوانه کامپوزیتی تحت ضربه سرعت پایین: تحلیل تجربی و عددی

یونس محمدی^{۱*}، حامد قاسمی^۲، مرتضی اسدی^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، قزوین، ایران

^۲باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۶

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۰۴

کلمات کلیدی:

ضربه سرعت پایین

استوانه کامپوزیتی

الیاف کربن

الیاف کولار

مدل سازی اجزاء محدود

خلاصه: نسبت استحکام به وزن بالا در کامپوزیت های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف سبب شده است که در بسیاری از سازه ها و قطعات مورد توجه واقع شود. در این مقاله به تحلیل تجربی و عددی چهار استوانه کامپوزیتی تحت ضربه با سرعت پایین پرداخته شده است. ساختار این لوله ها به صورت فقط کربن، فقط کولار، کولار- کربن/ خارج- کربن- داخل و کربن- خارج/ کولار- داخل می باشد. در تست آزمایشگاهی از دستگاه ضربه ی سقوط آزاد با یک ضربه زننده کرومی فولادی جهت اعمال ضربه بدون سرعت اولیه استفاده شده است. در بخش عددی جهت بررسی رفتار ضربه از روش مدل سازی اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش حاضر انواع روش های مدلسازی، فرایند مش بندی و انواع المان ها در نرم افزار مورد بحث قرار گرفته است. در تحقیق حاضر نیرو، مدت زمان تماس و جابجایی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج می توان دید که الیاف کولار قابلیت جذب انرژی بیشتری را نسبت به کربن داشته و استوانه فقط کربنی بیشترین نیروی تماسی و کمترین جابجایی را در مقایسه با سایر نمونه ها دارد. برای صحت سنجی، نتایج تجربی با نتایج نرم افزار آباکوس مطابقت داده شده است که تطابق بسیار نزدیکی بین دو نتیجه وجود دارد.

۱- مقدمه

در دهه های اخیر کامپوزیت های با زمینه پلیمری و تقویت شده با الیاف به دلیل خواصی همچون چگالی پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری شیمیایی ذاتی در دمای محیط و خواص مکانیکی بالا، به طور گسترده در سازه های هوا و فضا، تجهیزات ورزشی، مخازن تحت فشار، تجهیزات دریایی و قطعات خودرو مورد استفاده قرار گرفته اند. در بسیاری از زمینه های کاربردی، این ساختارهای کامپوزیتی به طور عمده با ضربه مواجه هستند. بنابراین این موضوع باعث شده است که بسیاری از محققان رفتار ضربه سرعت پایین را در سازه های کامپوزیتی چند لایه مورد بررسی قرار دهند. در بین هندسه های مختلفی که مورد استفاده قرار می گیرند تحلیل و بررسی لوله های کامپوزیتی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در خصوص کاربرد این لوله ها که معمولاً تحت تاثیر ضربه هستند می توان به لوله های مورد استفاده در پاروهای قایق رانی، ربات پرنده، ربات دلتا، سیستم تعلیق

دو جناقی، بدنه دوچرخه، قطعات مورد استفاده در خودروهای فرمول ۱، خطوط لوله های دریایی^۱ و مخازن مورد استفاده در صنایع نفت و گاز [۱ و ۲] اشاره نمود.

برای مثال، نیک و همکاران [۳] رفتار ضربه بر روی کامپوزیت های الیاف کربن و الیاف شیشه را به صورت جداگانه و یا به صورت ترکیبی از این دو الیاف در پیکربندی های متفاوت، مورد مطالعه قرار داده اند. آن ها نتیجه گیری کردند که پیکربندی های ترکیبی دارای مقاومت فشاری بهتر و جابجایی کمتر در مقایسه با کامپوزیت های فقط شیشه و فقط کربن می باشند. آن ها همچنین نشان دادند که کامپوزیت های ترکیبی کربن- خارج/ شیشه- داخل، جابجایی عرضی کمتر نسبت به انواع دیگر پیکربندی های ترکیبی تست شده، دارند. همچنین ترکیب شیشه خارج/ کربن- داخل، زمان تماس ضربه بیشتری در مقایسه با سایر ترکیب بندی های کامپوزیت دارند. ژو و چای [۴] یک مدل تئوری دقیق را برای پاسخ شبه استاتیکی یک صفحه ارائه کردند و پاسخ نیروی

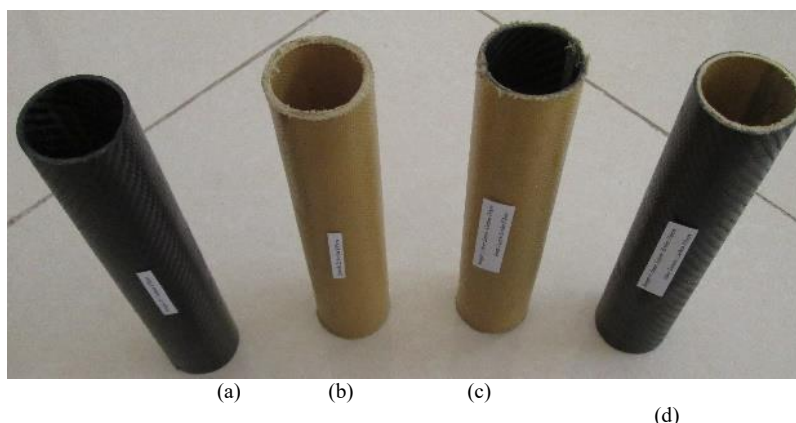


همچنین خلیلی و همکاران [۱۷] با استفاده از روش‌های صریح و ضمنی در آباکوس به مطالعه پاسخ ضربه در صفحات کامپوزیتی انحنادار پرداخته‌اند. همچنین کیستلر و واس [۱۸ و ۱۹] با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، پاسخ ضربه بر روی صفحات لایه‌ای انحنادار استوانه‌ای در ضربه سرعت پایین را مورد بررسی قرار داده‌اند. وانگ و همکاران [۲۰] رفتار لوله‌های سوراخ‌دار پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارگذاری محوری را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با کاهش قطر سوراخ و فاصله عرضی سوراخ، رفتار فشاری محوری لوله‌های سوراخ‌دار کامپوزیتی می‌تواند به طور قابل توجهی بهبود یابد. مهدی و سبای [۲۱]، به طور تجربی رفتار لوله‌های کامپوزیتی فایبرگلاس که در جهت شعاعی تقویت شده‌اند را مطالعه و بررسی کردند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که لوله‌هایی که در جهت شعاعی تقویت شده‌اند، بالاترین اوج بار، متوسط بار له‌شدگی و جذب انرژی را دارند. کارا و همکاران [۲۲] تاثیر تعمیر آسیب ناشی از ضربه وارده بر لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف بوسیله وصله‌های کامپوزیتی را بررسی کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که برای لوله‌های کامپوزیتی آسیب دیده، تعمیر با وصله‌های کامپوزیتی با تعداد لایه‌های کافی، مقاومت مورد نیاز را ایجاد می‌کند. مهدی و همکاران [۲۳] تاثیر جهت‌گیری الیاف بر جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی در حالت له‌شدگی محوری را مطالعه کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که لایه‌های بافته با چیدمان الیاف [۷۵-۱۵] و [۱۵-۷۵] از لحاظ جذب انرژی و توان تحمل بار، بهینه‌تر هستند. رفتار له‌شدگی محوری و پاسخ جذب انرژی لوله‌های مخروطی پر شده از فوم تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری، با استفاده از مدل المان محدود غیرخطی توسط احمد و ثمبیر اثنام [۲۴] بررسی شد. آن‌ها دریافتند که عملکرد له‌شدگی و جذب انرژی لوله‌های مخروطی، با پر کردن فوم به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

با توجه به کارهای انجام شده توسط محققان دیگر در این زمینه، نوآوری تحقیق حاضر مطالعه بر روی چهار سازه کامپوزیتی استوانه‌ای فقط کربن، فقط کولار، کولار-کولار/کربن-داخل و کربن-خارج/کولار-داخل و مقایسه نقش الیاف کربن و کولار در ضربه سرعت پایین می‌باشد. برای این هدف نیروی تماسی، مدت زمان تماس، تغییر شکل نمونه‌ها به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی واقع شده است و نتایج به دست آمده با نتایج حل عددی به روش اجزاء محدود

ضربه-جابجایی را برای صفحه ساندویچی کامپوزیتی در مقابل ضربه سرعت پایین محاسبه کردند و همچنین تاثیر اندازه‌های ضربه زننده را با مدل ریاضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وقتی سختی ناحیه ضربه اصلاح گردد، ماکزیمم نیروی تماسی کاهش و جابجایی در پوسته افزایش و میزان لایه لایه شدگی و ترک خوردگی به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. در دیگر حوزه‌های تحقیقات به بررسی رفتار آسیب بر روی سازه‌های ساندویچی تحت تاثیر ضربه سرعت پایین پرداخته‌اند [۵ و ۶]. معینی فرد و همکاران [۷] به بررسی تجربی انرژی جذب شده و نیروی تماسی پوسته کامپوزیتی بدون سفت‌کننده و با سفت‌کننده شبکه‌ای تحت فشار جانبی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده، در برابر بارگذاری جانبی، مستحکم‌تر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون تقویت‌کننده است.

کومار و همکاران [۸] پاسخ ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای لایه‌ای با جنس‌های گرافیت/اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. در برخی مطالعات [۹-۱۱] از روش‌های حل تحلیلی برای پاسخ ضربه در صفحات لایه‌ای استفاده شده است، اما تعدادی از پژوهشگران [۱۲ و ۱۳] از روش اجزاء محدود برای تحلیل پاسخ ضربه استفاده کرده‌اند. برای مثال، هر و لیانگ [۱۴] از نرم‌افزار انسیس^۱ برای تحلیل پاسخ گذرای کامپوزیت‌های لایه‌ای، استوانه‌ای و کروی استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش انحنا در کامپوزیت و شرایط مرزی محکم‌تر باعث افزایش نیروی ضربه و کاهش خیز در نمونه‌های کامپوزیت می‌شود. کانکو و همکاران [۱۵] به مطالعه بر روی پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن با هندسه استوانه‌ای در مقابل اعمال ضربه نیروی عرضی با استفاده از روش‌های اجزاء محدود و تجربی پرداخته‌اند. دیوید و همکاران [۱۶] تاثیر جهت الیاف بر روی مقاومت و همچنین رفتار استوانه‌های کامپوزیتی در مقابل ضربه را در پیکربندی‌های $(0_2/45_2/90_2/-45_2)_s$ ، $(0_2/45_2/90_2/-45_2)_s$ و $(90_2/45_2/0_2/-45_2)_s$ مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مطالعه نشان داد که جهت لایه چینی در کامپوزیت‌های نیمه منحنی به طور قابل توجهی در جذب انرژی تاثیر گذار است و اثر آسیب در استوانه کامپوزیتی با پیکربندی $(90_2/45_2/0_2/-45_2)_s$ دارای بیشترین مقدار می‌باشد.



شکل ۱: نمونه‌های مطالعه شده در این مقاله: (a) فقط کربن (b) فقط کولار (c) کولار-خارج/کربن-داخل (d) کربن-خارج/کولار-داخل

Fig. 1. The specimens used in the study: (a) carbon-only (b) kevlar-only (c) kevlar-outside/carbon-inside (d) carbon-outside/kevlar-inside

الیاف کربن و ۴ لایه داخلی الیاف کولار می‌باشد. تعداد ۹ لایه با استفاده از تحلیل در نرم‌افزار آباکوس قبل از ساخت و تست تجربی تعیین شده است و با این تعداد لایه، نمونه‌ها پس از اعمال ضربه با انرژی ۹/۴۲ ژول در محدوده الاستیک باقی می‌مانند و وارد محدوده پلاستیک نمی‌شوند. قطر داخلی، ضخامت و طول هر نمونه به ترتیب ۴۸/۵، ۳/۲۵ و ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. قابل ذکر است که الیاف کربن و الیاف کولار به ترتیب دارای چگالی ۲۰۰ و ۲۳۰ گرم بر متر مربع می‌باشند. الیاف بافته شده (تی^۵۳۰۰) کربن و کولار با رزین اپوکسی نوع ای.سی.۱۳۰ ال.وی^۶ ترکیب شده است. ترکیب رزین اپوکسی و هاردنر نوع دلبیو^۷۳۴۰ به نسبت ۱۰۰ به ۳۰ می‌باشد.

این نمونه‌ها با استفاده از روش دستی^۸ ساخته شده و خلاصه‌ای از روند ساخت آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در روش ساخت دستی استوانه‌های کامپوزیتی ابتدا الیاف کربن و کولار مطابق با اندازه محیط استوانه و ضخامت لایه‌ها برش داده می‌شود و سپس با استفاده از رزین مخلوط شده با هاردنر با نسبت ۱۰۰ به ۳۰، آغشته می‌شود. بعد از این مرحله تمامی الیاف روی قالب فلزی که آغشته به واکس^۹ و لایه جداکننده^{۱۰} می‌باشد پیچانده و سپس درون کوره پخت قرار داده می‌شود. فرایند پخت قطعات در دمای ۶۰ درجه سلسویس به مدت

مقایسه شده است. قابل ذکر است که الیاف کولار به دلیل اینکه در صنعت کاربرد زیادی پیدا کرده و دارای مقاومت بالایی در برابر بارهای ضربه‌ای و آسیب می‌باشد، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دید که الیاف کولار قابلیت جذب انرژی بیشتری را نسبت به الیاف کربن داشته و استوانه فقط کربنی بیشترین نیروی تماسی و کمترین جابجایی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارد. بیشینه نیروی تماس تست تجربی نمونه‌ی فقط کربن نسبت به نمونه‌ی فقط کولار به مقدار ۳۱ درصد بیشتر می‌باشد و تایید کننده قابلیت جذب بالای انرژی الیاف کولار نسبت به الیاف کربن می‌باشد.

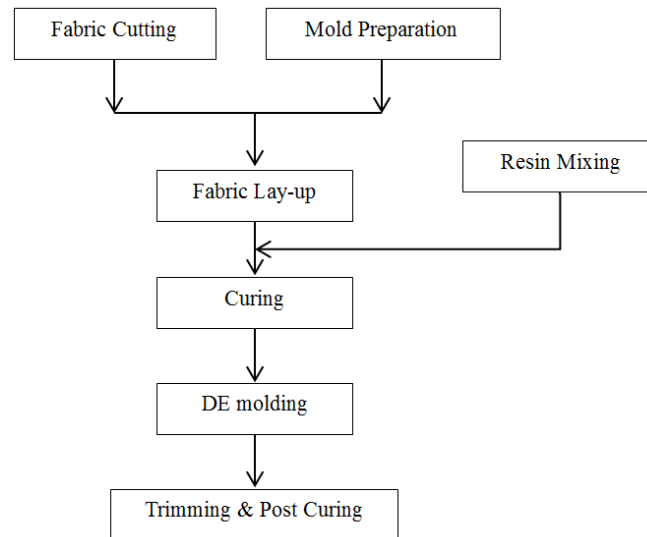
۲- روش آزمایش

۲-۱- خواص مواد و هندسه

چهار نمونه کامپوزیتی استوانه‌ای (شکل ۱) که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند: (الف) فقط کربن^۱، (ب) فقط کولار^۲، (ج) کولار خارج/ کربن داخل^۳، (د) کربن خارج/ کولار-داخل^۴ می‌باشند. در نمونه‌های (الف) و (ب) به ترتیب از ۹ لایه الیاف کربن و کولار بافته شده استفاده شده است. نمونه (ج) دارای ۵ لایه خارجی الیاف کولار و ۴ لایه داخلی الیاف کربن می‌باشد. نمونه (د) دارای ۵ لایه خارجی

- 5 T300
- 6 EC130LV
- 7 W340
- 8 Hand Lay-Up
- 9 Wax
- 10 Mould Release Agent

- 1 Carbon-Only
- 2 Kevlar-Only
- 3 Kevlar-Outside/Carbon-Inside
- 4 Carbon-Outside/Kevlar-Inside



شکل ۲: مراحل ساخت نمونه‌ها

Fig. 2. The manufacturing process of the specimens

الیاف بافته شده در جهات X و Y مشابه می‌باشند مدول الاستیسیته در دو جهت برابر شده است. نزدیک بودن نتایج آزمایشگاهی تست ضربه با نتایج تحلیل عددی گویای صحت مشخصات و خواص مواد می‌باشد.

۲-۲- آزمایش ضربه

تست ضربه در آزمایشگاه تحقیقاتی مواد کامپوزیتی در دانشگاه امیرکبیر انجام پذیرفته است. این دستگاه مطابق استاندارد ASTM D۷۱۳۶/۷۱۳۶M ساخته شده است. در این تست جهت ضربه بر روی نمونه‌ها ضربه‌زننده بدون سرعت اولیه رها گشته است (شکل ۴) شرایط مرزی نمونه‌ها در دو طرف گیردار می‌باشد.

این دستگاه تنها اولین ضربه‌ای که به نمونه برخورد می‌کند را ثبت می‌کند. یک شتاب‌سنج پیزوالکتریک ساخت شرکت دی تران^۲ آمریکا با قابلیت اندازه‌گیری شتاب تا g ۵۰۰۰، به بالای پرتابه جهت اندازه‌گیری تاریخچه نیروی تماسی از لحظه برخورد تا انتهای ضربه متصل شده است و نمودار شتاب-زمان را به عنوان خروجی اندازه‌گیری می‌کند. این بدان معناست که برای بدست آوردن نمودار جابجایی-زمان نیاز است که از نمودار شتاب-زمان دو مرحله انتگرال‌گیری شود.

ارتفاع نگهدارنده نمونه تا ضربه‌زننده فولادی کروی، ۳۰۰ میلی‌متر

۱۵ ساعت با توجه به اطلاعات فنی موجود در کاتالوگ رزین اپوکسی ای.سی.ال ۱۳۰ وی انجام پذیرفت. در نهایت قطعات از قالب‌ها جدا گردید و سپس با طول‌های ۲۵۰ میلی‌متر برش داده شد.

برای بررسی و محاسبه خواص مکانیکی نمونه‌ها از آزمایش تست کشش استفاده شده است. از هر ماده سه نمونه جهت تست کشش ساخته شده است. در این تست، با استفاده از کشش نمونه‌ها با سرعت ثابت و پیوسته میزان نیرو و تغییر طول اندازه‌گیری می‌شود. تست کشش بر اساس استاندارد ASTM D۳۰۳۹ می‌باشد که برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده می‌شود. خواص (چگالی، مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون) مورد استفاده جهت تحلیل در جدول ۱ نشان داده شده است.

تست کشش در موسسه پتروشیمی و پلیمر ایران توسط دستگاه تست کشش و فشار یونیورسال سنتام مدل اس.تی.ام-۱۵۰^۱ با ظرفیت ۱۵ تن که توسط مجموعه طراحی و مهندسی سنتام طراحی و ساخته شده، انجام گرفته است. در شکل ۳، این دستگاه و همچنین نمونه‌های کربن و کولار قبل و بعد از تست و نمودار تنش- کرنش نشان داده شده است.

در شکل ۳ قسمت d نمونه‌ای از نتایج تست کشش صفحات کربن و کولار در قالب نمودار تنش- کرنش آورده شده است و از شیب این نمودار، مقادیر مدول الاستیسته محاسبه شده است. با توجه به آنکه

جدول ۱: ابعاد و خواص صفحات کربن و کولار

Table 1: The properties of the carbon and kevlar fiber laminates

ابعاد / خواص	نماد	کولار	کربن
ضخامت نمونه (mm)	T	۱/۳۴	۱/۱۹
عرض نمونه (mm)	W	۲۶/۰۸	۲۵/۴
چگالی (kg/m^2)	P	۱۳۸۰	۱۳۸۰
مدول الاستیسیته (GPa)	E_x	۶۰	۱۲۰
	E_y	۶۰	۱۲۰
مدول برشی (GPa)	G_{xy}	۷/۵	۱۵
	G_{xz}	۷/۵	۱۵
	G_{yz}	۵	۹
نسبت پواسون	ν_{xy}	۰/۱۲	۰/۲۴

فرض، قطعات طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس قابلیت تغییر شکل دارند. در روش دوم فرض می‌شود که ضربه زننده به صورت قطعه صلب گسسته^۳ تعریف شود و نیاز به مش‌بندی می‌باشد. قطعه صلب گسسته مشابه با قطعه تغییرشکل‌پذیر می‌باشد که هر گونه هندسه را می‌توان ترسیم کرد. به هر حال این روش مدل‌سازی برای قطعاتی که تغییرشکل در لحظه تماس مهم نیست استفاده می‌شود.

در روش سوم قطعه به صورت صلب تحلیلی^۴ بوده که نیاز به مش‌بندی نمی‌باشد. این مدل‌سازی هم مانند روش دوم برای تحلیل تماسی که تغییر شکل مهم نیست استفاده می‌شود. هندسه به صورت دلخواه نبوده ولی سریعاً با استفاده از خطوط و کمان ترسیم می‌شوند [۲۵]. در مقاله حاضر مدل‌سازی ضربه زننده به صورت روش سوم یعنی پوسته صلب تحلیلی در نظر گرفته شده است.

۳-۲- مدل‌سازی استوانه و مش‌بندی

برای مدل‌سازی استوانه کامپوزیتی لایه‌ای، سه روش پوسته معمولی^۵، پوسته پیوسته^۶ و المان‌های جامد^۷ وجود دارد. چیدمان در لایه‌های کامپوزیت پوسته معمولی به گونه‌ای است که می‌توان مواد با

- 3 Discrete Rigid Part
- 4 Analytical Rigid Part
- 5 Conventional Shell
- 6 Continuum Shell
- 7 Solid Elements

می‌باشد. خواص هندسی و مکانیکی ضربه‌زننده در جدول ۲ نشان داده شده است.

انرژی ضربه زننده توسط معادله (۱)، $9/42$ ژول محاسبه شده است.

$$\Pi = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

در این معادله m جرم ضربه‌زننده، g شتاب گرانشی، h ارتفاع عمودی بین ضربه زننده و نمونه می‌باشد.

۳- مدل‌سازی اجزاء محدود

مدل‌سازی اجزاء محدود رفتار ضربه استوانه کامپوزیتی به وسیله نرم‌افزار آباکوس^۱ با نسخه ۱-۶، انجام شده است.

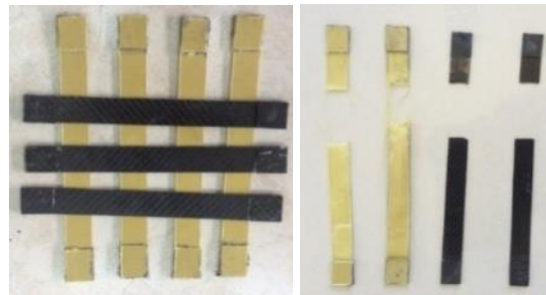
۳-۱- مدل‌سازی ضربه زننده

سه نوع روش برای مدل‌سازی ضربه‌زننده در نرم‌افزار آباکوس وجود دارد. در اولین روش، ضربه‌زننده یک قطعه جامد انعطاف‌پذیر^۲ فرض شده و جنس به آن اختصاص داده می‌شود. در واقع قطعه جامد تغییر شکل‌پذیر را می‌توان به صورت تقارن محوری دوبعدی و سه بعدی طراحی کرد و یا به صورت آماده وارد نرم‌افزار کرد. به طور پیش

- 1 ABAQUS
- 2 Deformable Solid Body

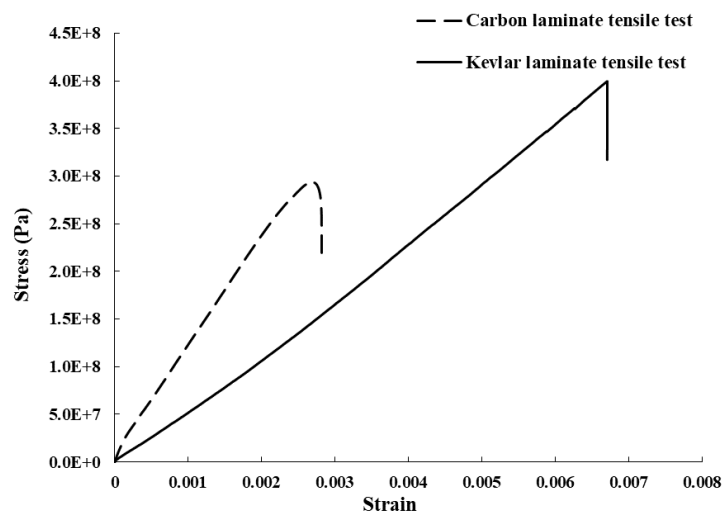


(a)



(b)

(c)



(d)

شکل ۳: (a) دستگاه تست کشش در این مقاله (b) نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن و کولار قبل از تست کشش (c) بعد از تست (d) نتایج تست کشش

Fig. 3. (a) The tensile test apparatus used in the study together with the carbon and kevlar laminates (b) before tensile test (c) after the tensile test (d) tensile results

جدول ۲: خواص و ابعاد ضربه زننده

Table 2: The properties of the impactor

فولاد	خواص / ابعاد
۷۸۰۰	چگالی (kg/m^3)
۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳	نسبت پواسون
۱۶	قطر (mm)
۳/۲	جرم کل (kg)

- تاثیرات برش عرضی بسیار زیاد باشد.
- از تنش‌های عمودی نتوان چشم‌پوشی کرد.
- دقت تنش‌های بین لایه‌ای مانند تنش در نزدیکی نواحی با بارگذاری و یا هندسه پیچیده اهمیت داشته باشد [۲۵].

شبیه‌سازی با استفاده از المان‌های جامد^۳ برای مسائل ضربه به صورت واقعی‌تر می‌باشد. در مقاله حاضر از المان پوسته معمولی جهت مدل‌سازی استوانه‌ی کامپوزیتی استفاده شده است.

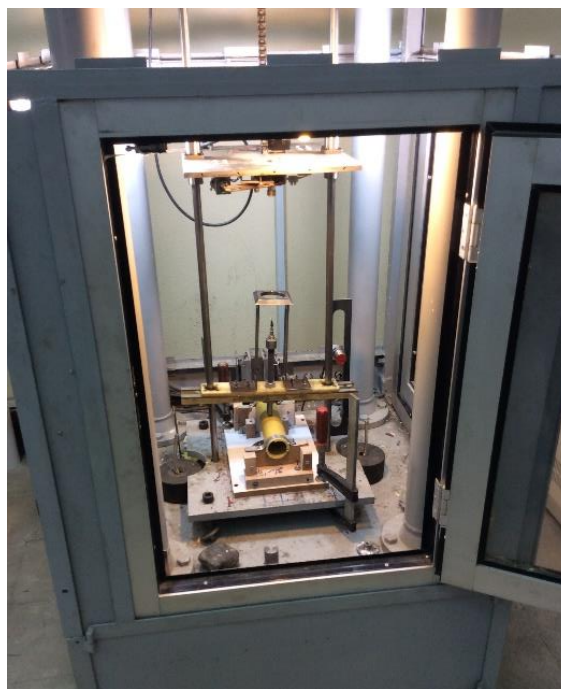
برای لایه‌چینی‌ها از انتگرال‌گیری سه نقطه در راستای ضخامت برای هر لایه در نظر گرفته شده است و از روش انتگرال‌گیری سیمسون استفاده شده است. مدل‌های ضربه‌زننده و استوانه کامپوزیتی در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. مش‌بندی کل مدل دارای تعداد ۱۲۴۴۴ گره و ۱۲۳۵۶ المان چهار ضلعی می‌باشد.

۳-۳- مدل‌سازی تماس

برای مدل‌سازی تماس، قوانینی زیادی وجود دارد که می‌توان به کار برد. روش مورد استفاده در این مقاله قانون تماسی سخت می‌باشد. قید تماس، زمانی به کار برده می‌شود که فاصله بین دو سطح برابر صفر شود. ضربه‌زننده و هدف به ترتیب سطح اصلی^۴ و گره تابع^۵ تعیین شده‌اند. زمان تماس بین دو جسم بسیار کوتاه و در حد چند میکروثانیه می‌باشد.

نیروی تماس یکی از مهم‌ترین نتایج تحلیل مسائل ضربه می‌باشد. نتایج تحلیل در این مقاله با فرضیات اساسی زیر به دست آمده‌اند:

- اصطکاکی بین ضربه‌زننده و استوانه کامپوزیتی در نظر



شکل ۴: دستگاه سقوط آزاد استفاده شده در این مقاله جهت تست ضربه

Fig. 4. The drop-weight impact apparatus used in the study

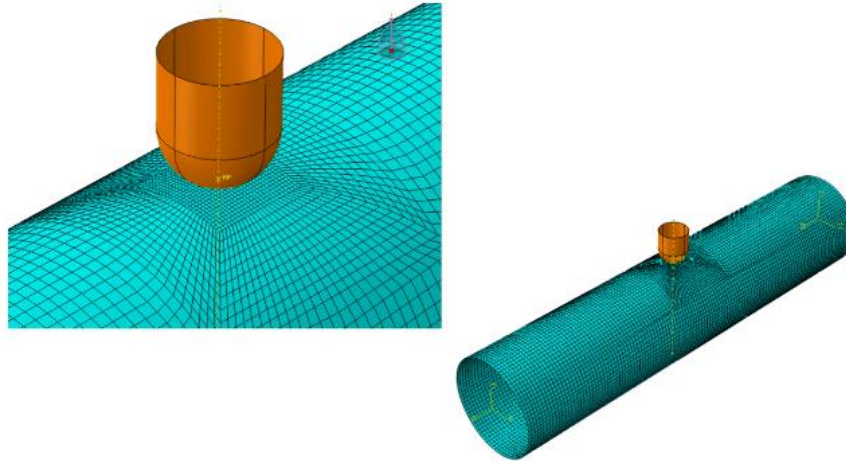
خواص مختلف را در جهات مختلف تعریف کرد. این چیدمان می‌تواند شامل تعداد زیادی لایه در موقعیت‌های مختلف باشد و رفتارهای پوسته معمولی را تحت تاثیر کشش، خمش، پیچش و برش عرضی به دست آورد. روش مورد استفاده برای حل به صورت انتگرال‌گیری می‌باشد و از المان‌های پوسته معمولی چهار گره‌ای^۱ با انتگرال‌گیری کاهش استفاده می‌شود.

استوانه کامپوزیتی پوسته پیوسته با استفاده از المان‌های پوسته پیوسته به صورت کاملاً گسسته در تمام جسم سه‌بعدی مدل می‌شود و دارای رفتارهای سینماتیکی بر اساس تئوری‌های پوسته می‌باشد. این چیدمان دارای یک المان در راستای ضخامت بوده که می‌تواند شامل تعداد زیاد المان باشد. این نوع مدل‌سازی بر اساس مش‌بندی با المان‌های هشت گره‌ای^۲ پوسته پیوسته همراه با روش انتگرال‌گیری کاهش استفاده می‌شود.

مدل‌سازی با استفاده روش المان‌های جامد مانند مدل‌سازی پوسته معمولی و پوسته پیوسته می‌باشد. ولی زمانی قابل استفاده می‌باشد که دارای تمامی شرایط زیر باشد:

3 C3D8R Element
4 Master Surface
5 Slave Nodes

1 S4R Elements
2 SC8R Elements



شکل ۵: مدل‌سازی ضربه زننده با استفاده از مدل پوسته صلب تحلیلی و مدل‌سازی استوانه با استفاده از المان پوسته معمولی

Fig. 5. Modeling the impactor using analytical rigid shell and modeling composite cylinders using the S4R element

سرعت برخورد در آباکوس توسط ابزار زمینه پیش‌تعریف^۱ مشخص می‌شود. این مقدار توسط معادله (۲) تعریف می‌شود.

$$V = \sqrt{2 \times g \times h} = 2.43 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2)$$

از آنجایی که ضربه‌زننده به صورت پوسته صلب تحلیلی مدل‌سازی شده است و در این مدل امکان تعریف خواص ماده وجود ندارد، سرعت اولیه، جرم و تمامی قيود به نقطه مرجع^۲ که متصل به مدل می‌باشد اعمال می‌شود. برای استوانه دقیقاً مشابه با تست تجربی، درجه آزادی محل تکیه‌گاه‌ها در تمام جهات مقید شده و مانند یک تکیه‌گاه گیردار عمل می‌کند.

۳-۶- الگوی مش‌بندی و مطالعه همگرایی

همان‌طور که مشخص است دستیابی به نتایج دقیق نیاز به مش‌بندی دقیق در مجاورت منطقه ضربه دارد. در این تحقیق به دلیل تقارن موجود در مدل و شکل ساده از المان‌های چهار ضلعی خطی^۳ با مش ساختاری^۴ استفاده شده است. برای به دست آوردن تعداد مطلوب المان‌ها، تحلیلی برای بررسی حساسیت و دقت پاسخ‌ها با تعداد المان‌های مختلف انجام می‌شود. در شکل ۶ قسمت a الگوی مش‌بندی در اطراف منطقه تماس برای نمونه فقط کولار نشان داده

گرفته نشده است.

- از تاثیرات دمپینگ در استوانه کامپوزیتی صرفه‌نظر شده است.
- از نیروی جاذبه در حین بازه تماس صرفه‌نظر شده است.
- ضربه‌زننده به صورت جسم صلب فرض شده است.

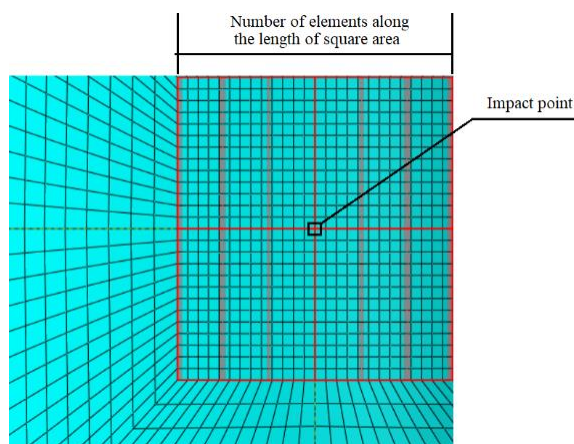
۳-۴- روش حل

برای اعمال بارگذاری دینامیکی در آباکوس می‌توان از دو الگوریتم ضمنی و صریح استفاده نمود. از الگوریتم صریح می‌توان برای حل مسائل غیرخطی، گذرا و دینامیکی و با استفاده از انتگرال‌گیری زمان صریح استفاده کرد. این الگوریتم در شبیه‌سازی مدل‌های بزرگ قابلیت اطمینان و راندمان محاسباتی بالا دارد و برای شبیه‌سازی‌های شبه استاتیکی که شامل رفتار غیرخطی ناپیوسته می‌باشد، بسیار کاربردی است. در الگوریتم آباکوس صریح هزینه تحلیل با افزایش ابعاد مسئله به صورت خطی افزایش می‌یابد حال آنکه در روش ضمنی این افزایش با شدت بیشتری می‌باشد و این موضوع دلیل استفاده از روش صریح برای حل مسائل با هندسه و بارگذاری بزرگ است [۲۵]. در این مقاله از روش تحلیلی صریح در مدت زمان ۰/۰۱ ثانیه استفاده شده است.

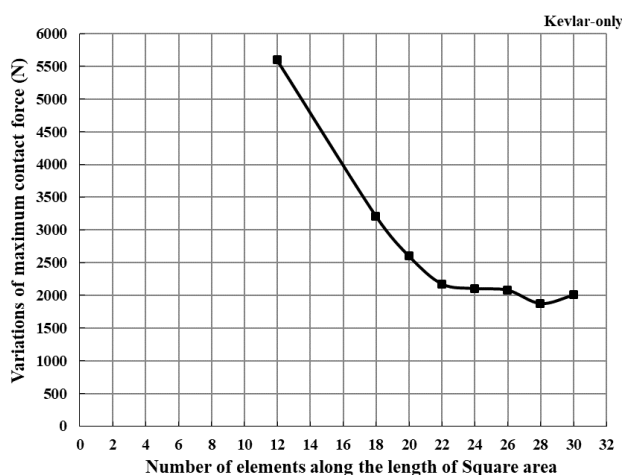
۳-۵- شرایط مرزی و بارگذاری

به منظور تعریف شرایط مرزی برای ضربه‌زننده، حرکت در تمامی جهات به جزء راستای برخورد با استوانه مقید شده است و مقدار

- 1 Predefined Field
- 2 Reference Point
- 3 Linear Quadrilateral Elements
- 4 Structured Mesh



(a)



(b)

شکل ۶: بررسی همگرایی تعداد المان‌ها (a) الگوی مش‌بندی برای ناحیه مربعی شکل در محل ضربه و (b) نمودار بیشینه نیروی تماس در مقابل تعداد المان‌ها در راستای طول ناحیه مربعی شکل

Fig.6. Convergence study of element numbers: (a) mesh pattern of the Square area surrounding the contact region and (b) maximum contact force versus number of elements along the length of square area

۴-۱- نتایج آزمایشگاهی

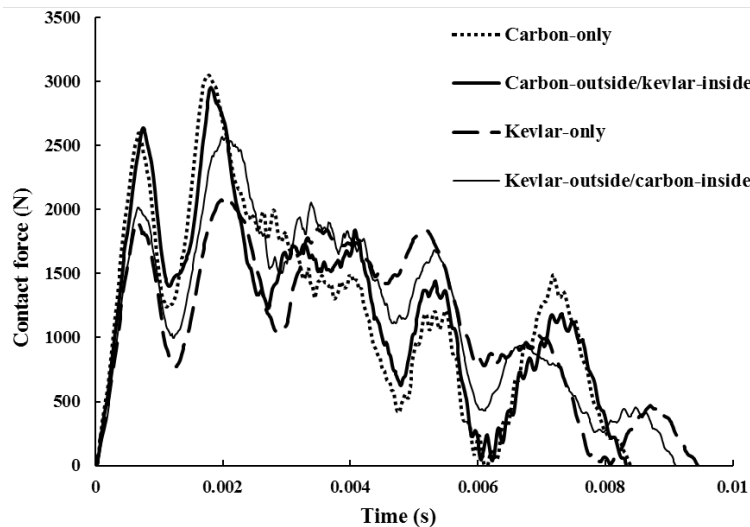
برای محاسبه نیروی تماسی، ۲۰۴۳ عدد داده ثبت شده است. با توجه به تعداد بالای داده‌ها و همچنین نوسانات موجود در نمودار نیروی تماس- زمان از روش میانگین متحرک^۱ جهت فیلتر نمودن نوسانات استفاده شده است. روش میانگین متحرک یکی از روش‌های آماری است که به صورت گسترده برای فیلتر کردن و استخراج داده‌ها در برنامه‌های علمی و مهندسی استفاده می‌شود. روش‌های عمومی میانگین متحرک به سه روش میانگین متحرک ساده، میانگین‌های متحرک وزنی و میانگین متحرک مرکزی تقسیم می‌شوند. از روش‌های

شده است. در شکل ۶ قسمت b نمودار همگرایی تعداد المان‌ها با بیشینه نیروی تماس نشان داده شده است و بیانگر این موضوع است که با افزایش تعداد المان‌ها پاسخ مسئله نزدیک‌تر به تست‌های تجربی می‌شود. با توجه به نمودار همگرایی تعداد ۶۷۶ المان (۲۶×۲۶) برای ناحیه مربعی شکل یعنی منطقه تماس، تعداد مناسبی می‌باشد.

۴- نتایج و صحت‌سنجی

در اولین قسمت از این بخش نتایج آزمایشگاهی مطالعه شده و در قسمت بعد نتایج تحلیل اجزاء محدود با هدف صحت‌گذاری مورد بررسی قرار داده می‌شود.

1 Moving Average



شکل ۷: نتایج تجربی تاریخچه نیروی تماس برای تمامی نمونه‌ها

Fig. 7. Experimental results for the contact force history of the specimens under study

انرژی بیشتری نسبت به کربن دارد. تفاوت بیشینه نیروی تماس بین دو نمونه فقط کربن و کربن-خارج/کولار-داخل در مقایسه بین دو نمونه فقط کولار و کولارخارج/کربن-داخل بسیار کمتر می‌باشد. این اختلاف به دلیل آن است که تماس در لایه‌های بیرونی اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر سرعت و انرژی به اندازه کافی جهت آسیب به لایه‌های داخلی نبوده است.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود به دلیل اینکه فرکانس طبیعی در حالت تست تجربی فعال می‌باشد و همچنین تأثیرات اینرسی و به خصوص انتشار موج خمشی وجود دارد، منحنی دارای حالت نوسانی است که ناشی از ضربه وارده بر لوله‌ها می‌باشد و دامنه نوسان با گذشت زمان به دلیل استهلاک انرژی، کاهش می‌یابد و پس از گذشت مدت زمانی سیر نزولی پیدا کرده و در لحظه‌ای خاص برابر صفر می‌شود [۲۷]. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود به دلیل مقدار کم انرژی ضربه‌زننده و همچنین بالا بودن خواص ماده در راستای اعمال ضربه باعث شده است که اختلاف بیشینه نیروی تماس بین نمونه‌های مورد آزمایش کم باشد.

۴-۲- صحنه‌گذاری عددی

در این قسمت نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی اجزاء محدود مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. صحنه‌گذاری عددی برای آن است که روش عددی می‌تواند مسئله ضربه را با دقت بالا تخمین بزند. ثابت شده است که استفاده از نتایج آزمایشگاهی در طراحی قطعات واقعی،

مرتبه بالاتر برای صاف کردن مقدار زیادی نوسان و داده‌های از دست رفته می‌توان استفاده نمود. روش میانگین‌های متحرک شامل محاسبه میانگین از آخرین مقادیر داده‌ها و استفاده از این میانگین برای پیش‌بینی مقدار سری زمانی برای دوره بعدی است. روش میانگین متحرک در صورتی که فرض شود آیتم پیش‌بینی شده در طول زمان نسبتاً پایدار باقی بماند بسیار مفید می‌باشد [۲۶].

تاریخچه نیروی تماسی برای نمونه‌های مورد مطالعه با ضربه سرعت پایین در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشینه نیروی تماس در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب فقط کربن، کربن-خارج/کولار-داخل، کولار-خارج/کربن-داخل و فقط کولار می‌باشد. در این شکل کاملاً واضح است که مدت تماس با بیشینه نیروی تماس رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر لایه کربن در لایه‌های خارجی استوانه کامپوزیتی باعث شده است که بیشینه نیروی تماس افزایش و مدت زمان تماس کاهش یابد. همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های کربن-خارج/کولار-داخل و کولار-خارج/کربن-داخل نشان می‌دهد که لایه بیرونی نقش مهمی را ایفا می‌کند و این موضوع به دلیل تماس ضربه‌زننده با لایه بیرونی می‌باشد. بدین ترتیب نمونه کربن-خارج/کولار-داخل دارای بیشینه نیروی تماسی با مقدار ۱۲/۷ درصد بیشتر و مدت زمان تماس کمتری نسبت به نمونه کولار-خارج/کربن-داخل دارد.

در نمونه‌های فقط کولار و کولار-خارج/کربن-داخل، وجود لایه کولار باعث شده است که بیشینه نیروی تماس نسبت به دو نمونه دیگر کاهش یابد. و این موضوع بیانگر آن است که لایه کولار قابلیت جذب

• در طی تست‌های تجربی، اصطکاک در امتداد ریل‌های تکیه‌گاه و سطوح تماس وجود دارد، اما نیروهای اصطکاک در مدل‌سازی اجزاء محدود صرفه نظر شده است.

• در نمونه واقعی لایه‌ها به صورت کامل به یکدیگر نچسبیده‌اند اما در مدل‌سازی اجزاء محدود فرض شده است که کاملاً لایه‌ها به یکدیگر چسبیده‌اند.

در جداول ۳ و ۴ داده‌های عددی و آزمایشگاهی بیشینه نیروی تماس و مدت زمان تماس برای چهار نمونه به ترتیب مقایسه شده‌اند.

تعدادی از مشکلات را به همراه دارد. این را می‌توان این صورت توضیح داد که تنظیمات تست آزمایشگاهی به ندرت به شرایط قطعات واقعی به‌ویژه در مورد شرایط تکیه‌گاهی مطابقت دارد [۲۸].

چند اختلاف بین دو مجموعه از نتایج مشاهده شده است. این تفاوت‌ها را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

• تست‌های تجربی احتمال وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی را نشان می‌دهد در حالی که استوانه‌ها در تحلیل عددی به صورت کاملاً الاستیک در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۳: نتایج تجربی و عددی به دست آمده برای بیشینه نیروی تماس

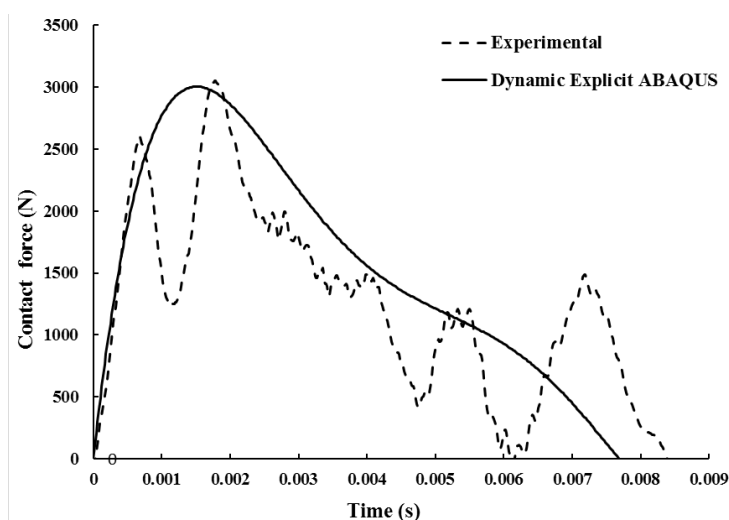
Table 3: Experimental and numerical results for maximum contact force (N)

کربن - خارج / کولار - داخل	کولار - خارج / کربن - داخل	فقط کولار	فقط کربن	
۲۹۵۲	۲۵۷۶	۲۰۹۷	۳۰۴۲	نتایج تجربی
۲۹۱۱	۲۶۵۳	۲۰۷۵	۲۹۹۷	نتایج عددی
۱/۴	۲/۹	۱	۱/۵	درصد اختلاف

جدول ۴: نتایج تجربی و عددی به دست آمده برای مدت زمان تماس

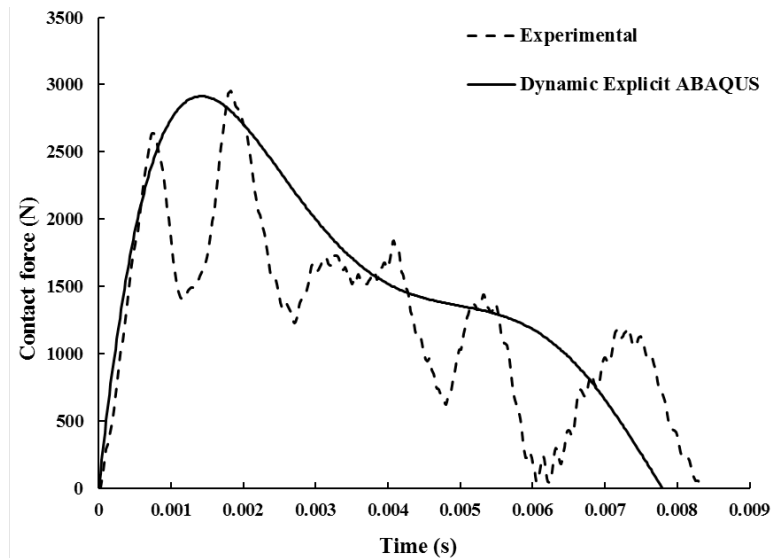
Table 4: Experimental and numerical results for contact duration (s)

کربن - خارج / کولار - داخل	کولار - خارج / کربن - داخل	فقط کولار	فقط کربن	
۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۸۴	نتایج تجربی
۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۷۷	نتایج عددی
۶/۴	۰/۵۶	۷/۹۵	۹/۱	درصد اختلاف



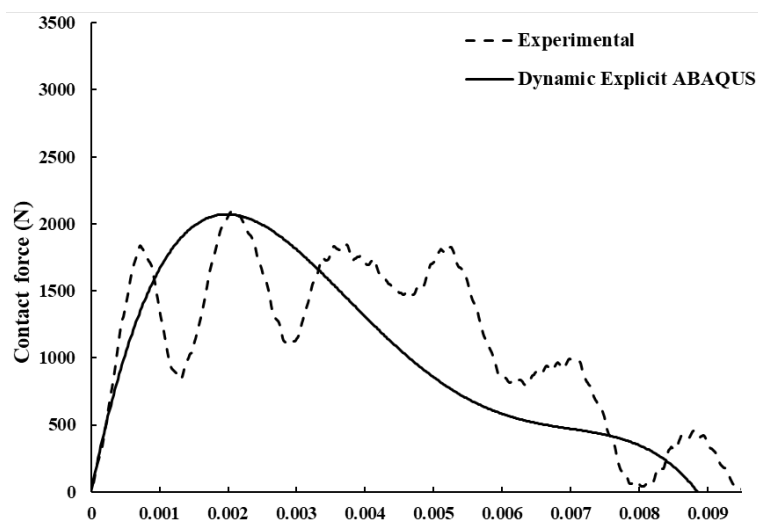
شکل ۸: نتایج نتایج تجربی و عددی تاریخچه نیروی تماس برای نمونه فقط کربن

Fig. 8. Experimental and numerical results for the contact force history of the carbon-only specimen



شکل ۹: نتایج تجربی و عددی تاریخچه نیروی تماس برای نمونه کربن-خارج/کولار-داخل

Fig. 9. Experimental and numerical results for the contact force history of the carbon-outside/kevlar-inside specimen



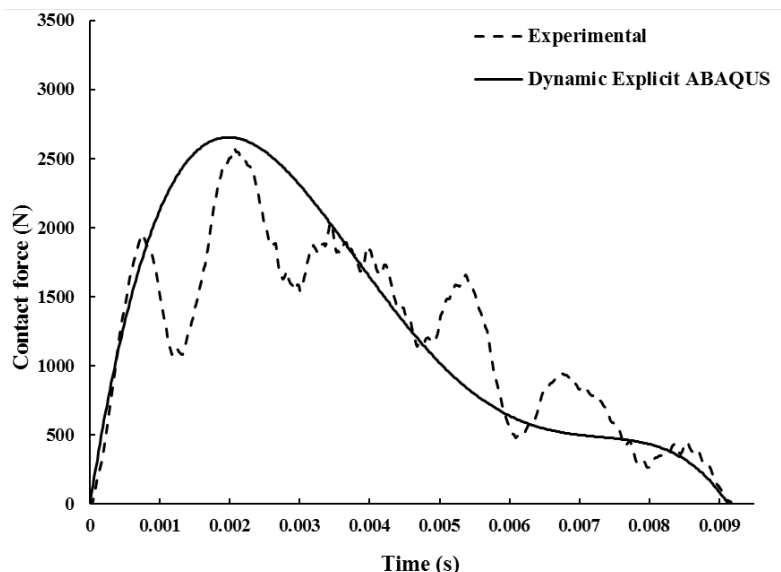
شکل ۱۰: نتایج تجربی و عددی تاریخچه نیروی تماس برای نمونه فقط کولار

Fig. 10. Experimental and numerical results for the contact force history of the kevlar-only specimen

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، به دلیل اینکه فرکانس طبیعی در حالت تجربی فعال می‌باشد نمودارهای حاصل از تست تجربی دارای حالت نوسانی همراه با استهلاک می‌باشد، ولی در نمودارهای تحلیل عددی به دلیل اینکه در نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض ترم ارتعاشاتی غیر فعال است نوسان مشاهده نمی‌شود. موضوع دیگری که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است جابجایی و تغییر شکل در استوانه‌های کامپوزیتی می‌باشد که توسط

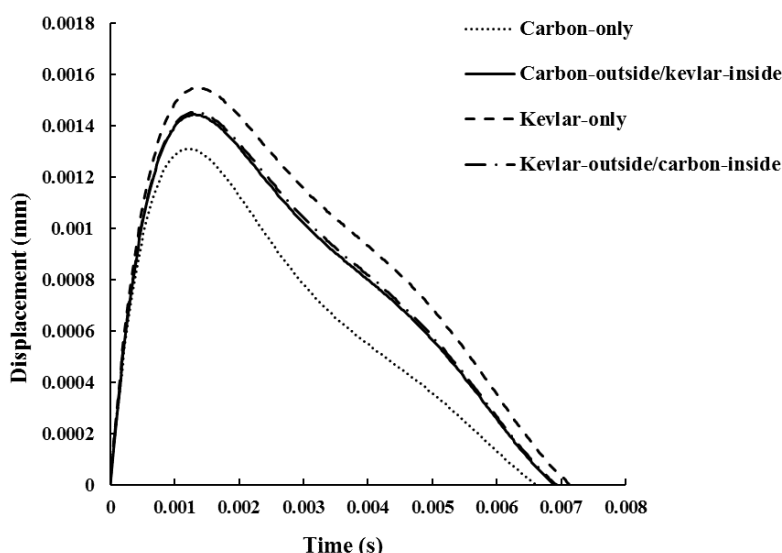
اطلاعات ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که اختلاف حداقلی بین دو مجموعه داده‌ها وجود دارد.

مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای تاریخچه نیروی تماس برای هر کدام از نمونه‌ها به صورت جداگانه در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل‌ها نیز می‌توان نزدیکی پاسخ‌ها را بین دو مجموعه از نتایج دید. علاوه بر این روشن است که تمامی نمونه‌ها دارای رفتاری مشابه از نظر نیروی تماس می‌باشند.



شکل ۱۱: نتایج تجربی و عددی تاریخچه نیروی تماس برای نمونه کولار-خارج/کربن-داخل

Fig. 11. Experimental and numerical results for the contact force history of the kevlar-outside/carbon-inside specimen



شکل ۱۲: نتایج عددی تاریخچه جابجایی برای تمامی نمونه‌ها

Fig. 12. Numerical results for the deflection history of the specimens under study

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر، پاسخ‌های ضربه سرعت پایین مربوط به چهار استوانه کامپوزیتی (فقط کربن، کربن-خارج/کولار-داخل، کولار-خارج/کربن-داخل و فقط کولار) را با هدف بررسی نیروی تماس، مدت تماس و جابجایی مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله داده‌های تجربی از تست ضربه سرعت پایین با شبیه‌سازی عددی اجزاء محدود مقایسه شده است. همان‌طور که از

جابجایی گرهی واقع در بالاترین سطح و در نقطه مرکزی از هر نمونه مشخص شده است.

تاریخچه جابجایی برای استوانه‌های کامپوزیتی با استفاده از روش عددی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. دیده می‌شود که بیشترین و کمترین جابجایی به ترتیب برای نمونه فقط کولار و فقط کربن می‌باشد. نکته قابل توجه در شکل‌های ارائه شده در آن است که وقتی نیروی تماس افزایش یابد بیشینه مقدار جابجایی کاهش می‌یابد.

- [3] Naik, N. K., Ramasimha, R., Arya, H., Prabhu, S.V., ShamaRao, N., 2001. "Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 32, No. 7, pp. 565-574.
- [4] Zhu, S., Chai, G. B., 2015. "Low-velocity impact response of composite sandwich panels", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 230, No. 2, pp. 388-399.
- [5] Mines, R. A. W., Worrall, C. M., Gibson, A. G., 1998. "Low velocity perforation behavior of polymer composite sandwich panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 10, pp. 855-879.
- [6] Dear, J. P., Lee, H., Brown, S. A., 2005. "Impact damage process in composite sheet and sandwich honeycomb materials", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 1-4, pp. 130-154.
- [7] Moeinifard, M., Liaghat, G., Rahimi, G., Talezadehlari, A., Hadavinia, H., 2016. "Experimental investigation on the energy absorption and contact force of unstiffened and grid-stiffened composite cylindrical shells under lateral compression", *Composite Structures*, Vol. 31, No. 152, pp. 626-636.
- [8] Kumar, S., Rao, B. N., Pradhan, B., 2007. "Effect of impactor parameters and laminate characteristics on impact response and damage in curved composite laminates", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 26, No. 13, pp. 1273-1290.
- [9] Christorforou, A. P., Swanson, S. P., 1991. "Analysis of impact response in composite plates", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 27, No. 2, pp. 161-170.
- [10] Cairns, D. S., Lagace, P. A., 1989. "Transient response of graphite/epoxy and Kevlar/epoxy laminates subjected to impact", *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 11, pp. 1590-1596.
- [11] Prasad, C. B., Ambur, D. R., Starnes, J. H., 1993. "Response of laminated composite plates to low speed impact by airgun propelled and dropped weight

نتایج به دست آمده است، مشخص شد که نمونه فقط کربن دارای نیروی تماس بالاتر و جابجایی کمتر بین تمامی نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. علاوه بر این، نمونه فقط کولار دارای کمترین مقدار نیروی تماس و بیشترین جابجایی می‌باشد.

بیشینه نیروی تماس تست تجربی نمونه فقط کربن نسبت به نمونه فقط کولار به مقدار ۳۱ درصد بیشتر می‌باشد و بیانگر قابلیت بالای جذب انرژی الیاف کولار نسبت به الیاف کربن می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های ترکیبی کربن و کولار نشان می‌دهد که لایه بیرونی نقش مهمی را ایفا می‌کند و این موضوع به دلیل تماس ضربه زننده با لایه بیرونی می‌باشد. بنابراین بیشینه نیروی تماس تست تجربی نمونه کربن-خارج/کولار-داخل نسبت به نمونه کولار-خارج/کربن-داخل به مقدار ۱۲/۷ درصد بیشتر می‌باشد.

همچنین اختلاف بیشینه نیروی تماس تست تجربی بین نمونه‌های فقط کربن و کربن-خارج/کولار-داخل، ۲/۹۶ درصد می‌باشد که در مقایسه با اختلاف بیشینه نیروی تماس دو نمونه فقط کولار و کولار خارج/کربن-داخل به مقدار ۱۵/۶۴ درصد کمتر می‌باشد. این اختلاف به دلیل آن است که تماس ضربه‌زننده با نمونه‌ها در لایه‌های بیرونی اتفاق می‌افتد و این موضوع نشان می‌دهد که لایه کولار قابلیت جذب انرژی بیشتری نسبت به کربن را دارد و همچنین سرعت و انرژی به اندازه کافی جهت آسیب به لایه‌های داخلی نبوده است.

در نهایت باید اشاره کرد که با توجه به جداول ۳ و ۴ پاسخ‌های نتایج عددی و تجربی بسیار به یکدیگر نزدیک هستند و اختلاف پاسخ‌ها به ترتیب کمتر از ۳ و ۱۰ درصد برای بیشینه نیروی تماس و مدت زمان تماس می‌باشد.

مراجع

- [1] Guz, I. A., Menshykova, M., Paik, J. K., 2017. "Thick-walled composite tubes for offshore applications: an example of stress and failure analysis for filament-wound multi-layered pipes", *Ships and Offshore Structures*, pp. 304-322.
- [2] Evans, K. E., and Alderson, K. L., 1992. "Low velocity transverse impact of filament-wound pipes: Part 2. Residual properties and correlations with impact damage", *Composite Structures*, 20(1), pp.47-52.

- “Behaviour of perforated GFRP tubes under axial compression”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 95, No. 7, pp. 88-100.
- [21] Mahdi, E., Sebaey, T. A., 2014. “An experimental investigation into crushing behavior of radially stiffened GFRP composite tubes”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 76, No. 2, pp. 8-13.
- [22] Kara, M., Uyaner, M., Avci, A., 2015. “Repairing impact damaged fiber reinforced composite pipes by external wrapping with composite patches”, *Composite Structures*, Vol. 123, No. 14, pp. 1-8.
- [23] Mahdi, E., Hamouda, A. M. S., Sebaey, T. A., 2014. “The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes”, *Materials & Design*, Vol. 56, No. 6, pp. 923-928.
- [24] Ahmad, Z., Thambiratnam, D. P., 2009. “Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading”, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2393-2403.
- [25] Dassault System’s Simulia Corp., 2010. “The ABAQUS6.10-1 user’s manual”, USA.
- [26] Farooq, U., Myler, P., 2015. “ Prediction of load threshold of fibre-reinforced laminated composite panels subjected to low velocity drop-weight impact using efficient data filtering techniques”, *Results in Physics*, Vol. 5, pp. 206-221.
- [27] Choubini, M., Liaghat, G. H., Pol, M. H., 2014. “Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-83. (in Persian)
- [28] Davies, G. A. O., Zhang, X., 1995. “Impact damage prediction in carbon composite structures”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 149-170.
- impactors”, *AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*.
- [12] Sun, C. T., Chen, J. K., 1985. “On the impact of initially stressed composite laminates”, *Journal of Composite*, Vol. 19, No. 6, pp. 490-504.
- [13] Achrach, W. E., Hansen, R. S., 1989. “Mixed finite element method for composite cylinder subjected to impact”, *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 5, pp. 632-638.
- [14] Her, S. C., Liang, Y. C., 2004. “The finite element analysis of composite laminates and shell structures subjected to low velocity impact”, *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 277-285.
- [15] Kaneko, T., Sato, K., Ujihashi, S., Yomoda, H., 2007. “Finite element failure analysis of carbon fiber reinforced plastic cylinders under transverse impact loading”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 221, No. 2, pp. 103-112.
- [16] David West, O. S., Nash, D. H., Banks, M. W., 2014. “Low-velocity heavy mass impact response of singly curved composites”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 228, No. 1, pp. 17-33.
- [17] Khalili, S. M. R., Soroush, M., Davar, A., Rahmani, O., 2011. “Finite element modeling of low-velocity impact on laminated composite plates and cylindrical shells”, *Composite Structures*, Vol. 93, No. 5, pp. 1363-1375.
- [18] Kistler, L. S., Waas, A. M., 1998. “Impact response of cylindrically curved laminates including a large deformation scaling study”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 1-2, pp. 61-75.
- [19] Kistler, L. S., Waas, A. M., 1999. “On the response of curved laminated panels subjected to transverse impact loads”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, No. 9, pp. 1311-1327.
- [20] Wang, W., Sheikh, M. N., Hadi, M. N., 2015.