



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی عددی پارامترهای موثر بر پاسخ لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه محوری

نبی‌الله رضائی گلشن¹، محمد حسین پل^{2*}، امید نجف‌زاده اصل¹

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تفرش، 143-14115، m_h_pol@tafreshu.ac.ir

چکیده

لوله‌های کامپوزیتی در طول استقرار در محل یا کارکرد، ممکن است تحت بارهای ضربه‌ای قرار گیرند. بارهای ضربه‌ای می‌توانند در اثر سقوط اجسام، به وجود آمده و آسیب‌های داخلی قابل توجهی را ایجاد کنند که موجب کاهش شدید مقاومت باقیمانده لایه‌ها در لوله‌های کامپوزیتی می‌شود. در این پژوهش، پارامترهای موثری نظیر ضخامت لوله، انرژی ضربه و قطر داخلی بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی تک‌جداره تحت بارگذاری ضربه‌ای و آسیب‌های ناشی از این بارگذاری، به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار ال‌اس‌داین‌ا موردمطالعه و بررسی قرار گرفته است. به این منظور لوله‌های کامپوزیتی با استفاده از المان 3D Solid 164 و مدل ماده CODAM مدل سازی شده و تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین قرار داده شد. به منظور صحت سنجی داده مدل سازی و نتایج عددی، بعضی از نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه گردید. برای ساخت نمونه تجربی از سخت کننده اف 205، رزین اپیون 828 و الیاف 400 گرمی شیشه استفاده گردید. بررسی نتایج نشان داد نتایج عددی همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارد. بررسی نتایج تحلیل عددی نشان داد که با افزایش قطر داخلی شیب نمودار تغییراتی نمی‌کند به عبارت دیگر با افزایش قطر استحکام نمونه افزایش و علاوه بر آن مقاومت نمونه در برابر ضربه هم افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش تعداد لایه‌ها در ساختار نمونه کامپوزیتی، سطح نیروی متوسط نمودار نیرو-جابجایی بالاتر می‌رود که نشان‌دهنده افزایش مقاومت نمونه، در برابر بار ضربه‌ای وارد شده است.

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/10/18

پذیرش: 97/03/01

کلیدواژگان:

لوله کامپوزیتی

خواص ضربه‌ای

سقوط وزنه

ضربه سرعت پایین

Numerical investigation of the parameters affecting on the composite tubes response under axial impact

Nabi Rezaei Golshan, Mohammad Hossein Pol* Omid Najafzadeh Asl

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

*P.O.B. 14115-143 Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

Keywords

Comosite tube
Impact peroperties
Drop weight
Low velocity impact

Abstract

There is possibility of impact loading on composite tubes while they are being placed or operated. Impact loads can be caused by the objects falls and they are able to make considerable internal damages that decrease residual resistance of layers in composite tubes. In the present study, effective parameters such as tube thickness, impact energy and inner diameter on single-wall tubes behavior under impacting and its consequent damages have been studied numerically, using LS-dyna software. Therefore, composite tubes have been modeled using 3D Solid 164 element and CODAM material model and they have been impact loaded with low velocity. In order to validate the numerical results and modeling, some of the numerical results have been compared with experimental data. An experimental sample of F205 hardener, Epon 828 resin and 400 g/m² glass fiber was used to make the test sample. There is a reasonable good agreement between experimental and numerical results. Result discussion showed that there are no changes in diagram slope with increase in inner diameter. In other words sample strength and its resistance to impact are increased with growing in inner diameter. Furthermore, mean force level of force-displacement diagram goes up with increase in number of layers in composite sample structure which indicates an increase in sample resistance to impact

Please cite this article using:

Rezaei Golshan, N. Pol, M.H. Najafzadeh Asl, O., "Numerical Investigation of the Parameters Affecting on the Composite Tubes Response under Axial Impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 200-212, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

کامپوزیت‌ها¹ (مواد چند سازه‌ای) از رده‌های مواد پیشرفته هستند که در آنها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. در یک کامپوزیت به طور کلی الیاف²، عضو بارپذیر اصلی سازه هستند در حالیکه ماتریس³ آنها را در محل و آرایش مطلوب نگاهداشته و بعنوان یک محیط منتقل کننده بار بین الیاف عمل می‌کند، به علاوه آنها را از صدمات محیطی در اثر بالا رفتن دما⁴ و رطوبت⁵ حفظ می‌کند. در میان تمام مواد، مواد کامپوزیتی این پتانسیل را دارند که به طور گسترده‌ای برای جایگزینی فولادها و آلومینیوم‌ها با عملکرد بهتر استفاده شوند. جایگزین کردن اجزای فولادی با اجزای کامپوزیت می‌تواند 60 تا 80 درصد صرفه‌جویی و 20 تا 50 درصد صرفه‌جویی در وزن با تعویض قطعات آلومینیومی شود. مشخصات کامپوزیت‌ها اساساً تحت تاثیر انتخاب نوع الیاف قرار دارد. به طور کلی سه نوع الیاف از همه کاربرد بیشتری دارند که عبارتند از کربن، شیشه و آرامید هستند. مهمترین مشخصه‌ای که موجب تمایز بین این سه نوع الیاف می‌شود سفتی و کرنش کششی آنها می‌باشد [4-1].

از مسائل مهم در کامپوزیت‌ها تاثیر ضربه بر روی این سازه‌ها است و چنین ضرباتی در حین کارکرد این نوع قطعات به وجود می‌آید که باعث ایجاد آسیب‌های داخلی در این نوع سازه‌ها و در نتیجه، کاستی استحکام قطعه می‌شود. در زمینه ضربه به روی کامپوزیت‌ها مطالعات زیادی انجام شده است با این حال هنوز تمام جنبه‌های این نوع سازه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. انجام چنین آزمایش‌هایی نیاز به صرف هزینه‌های سنگینی دارد. بنابراین می‌توان با استفاده از شبیه سازی این گونه مواد در نرم افزار تمام موارد را اول در حالت شبیه سازی انجام و بعد در کار تجربی استفاده نمود در این صورت است که می‌توان از صرف هزینه‌های سنگین جلوگیری و به پیش برد اهداف سرعت بخشید [5-7].

کیم و همکاران [8] شکست مودها و توانایی جذب انرژی کامپوزیت‌های ساخته شده با انواع رزین اپوکسی و الیاف را بررسی کرده‌اند. در این تحقیق رابطه‌ی بین پارامترهای له‌شدگی و جزئیات مواد برای انواع الیاف و شکل‌ها بررسی شد. بر اساس تجزیه تحلیل جواب‌ها، سرعت خطی و پارامترهای له‌شدگی، همبستگی خوبی با مقاومت فشاری و مدول برشی دارد.

چهرمی و همکاران [9] به بررسی جذب انرژی لوله‌های منبسط شده چند لایه فلزی تحت ضربه محوری پرداخته‌اند. آنها برای به دست آوردن مقدار خرابی و ماکزیمم انرژی جذب شده از مکانیزم سقوط وزنه به صورت تجربی استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش ضخامت و ساخت جاذب انرژی چند لایه می‌توان ماکزیمم نیروی له‌شدگی و توانایی جذب انرژی را بهبود بخشید.

چیو و همکاران [10] مطالعه‌ی تجربی بر رفتار کامپوزیت کربن/اپوکسی تحت بار استاتیکی و دینامیکی تا نرخ کرنش $100 s^{-1}$ انجام دادند. آنها مودهای آسیب و پاسخ نیروهای اندازه گیری شده برای هر نمونه آزمایش با نرخ کرنش را یکسان به دست آوردند. نتایج نشان داد که مواد آزمایش شده تا نرخ کرنش $100 s^{-1}$ ، وابسته به نرخ کرنش نیستند. همچنین مودهای آسیب بدست آمده، نیز با افزایش نرخ بارگذاری نمونه‌ها، ثابت مانده است. آنها بیان می‌کنند که این مستقل بودن از نرخ کرنش، احتمالاً در نتیجه ترکیب مقدار

بالای الیاف در چند لایه کامپوزیتی و نرخ آزاد سازی انرژی زیاد در نتیجه شکستن ساختارها با الیاف تقویت شده زیاد در مقایسه با ساختارهای با ماتریس بالا است.

مهدی و سبای [11]، به طور تجربی رفتار لوله‌های کامپوزیتی رشته پیچی شده که در جهت شعاعی تقویت شده‌اند را مطالعه و بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که لوله‌هایی که در جهت شعاعی تقویت شده‌اند، بالاترین اوج بار، متوسط بار له‌شدگی و جذب انرژی را دارند.

حاتمی و همکاران [12] به بررسی تئوری پاسخ جذب انرژی از لوله‌های فلزی منبسط شده تحت بار ضربه‌ای پرداخته‌اند. این آزمایش‌ها به صورت عددی و تجربی انجام شده است. له‌شدگی در ارتفاع‌های مختلف بررسی و مشخص شد که با افزایش ارتفاع افزایش تخریب، متوسط نیرو و مدت جذب را در پی خواهد داشت. در این تحقیق از نمودار نیرو-جابجایی برای تحلیل وقایع نمونه استفاده شده است.

دهقانی و همکاران [13] در پژوهش خود به صورت عددی و تجربی اثر طولی تقویت کننده‌ها در جذب انرژی روی استوانه و مخروط زیر بار ضربه‌ای محوری را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش پاسخ‌های عددی با نتایج تجربی مقایسه شد و همچنین به توافق خوبی بین نتایج عددی و تجربی رسیده شده است. نتایج بیان می‌کند که با کاهش تخریب مقدار نیرو در ناحیه اول افزایش پیدا کرده و مقدار له‌شدگی نمونه استوانه‌ای از مخروطی کمتر بوده است.

ژانگ و همکاران [14] مدل‌سازی المان محدود برای له‌شدگی محوری شبه استاتیکی لوله‌های کامپوزیتی بافته شده را بررسی کرده‌اند. نتایج شبیه سازی در نهایت با استناد به آزمایش له‌شدگی شبه استاتیکی اثبات شد. مود شکست و خواص جذب انرژی مطابقت خوبی با نتایج آزمایش‌ها داشتند. آنها نتیجه گرفتند که این روش می‌تواند برای حل مسائل مشابه در ارتباط با مواد کامپوزیتی پیشرفته مفید باشد.

هونگ و وانگ [15] به بررسی پاسخ له‌شدگی لوله‌های تقویت شده با الیاف کربن تحت بارگذاری شبه استاتیکی پرداختند. آنها دریافتند که وجود پخ در یک انتهای لوله باعث ایجاد کنترل در وضعیت له‌شدگی، کاهش نیروی اوج اولیه و افزایش استحکام رونده‌ی له‌شدگی محوری می‌شود. همچنین دریافتند که مدل‌سازی پخ ارائه شده و انتخاب المان دو بعدی در تحلیل عددی، به دلیل مطابقت نمودارهای مدل‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی مناسب بوده است.

ما و یان [16] پاسخ مقاومت در برابر ضربه لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری دینامیکی و شبه استاتیکی را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها دریافتند که مقدار زیاد شکست الیاف با افزایش انرژی جذب شده تا 80 کیلوژول بر کیلوگرم است. همچنین، ضخامت لوله‌ها نیز در نرخ ضربه‌های مختلف، تاثیر معکوس بر میزان انرژی جذب شده دارد.

هان و همکاران [17] یک بررسی عددی جامع برای ارزیابی پاسخ و ظرفیت جذب انرژی لوله‌های ترکیبی ساخته شده از کامپوزیت پلاستیکی تقویت شده با الیاف پیچیده شده در جهت $45^\circ \pm$ به روش پالتروژن را انجام دادند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی عددی، رفتار خرد شدگی این لوله‌ها را تحت هر دو بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی محوری بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که اگرچه لوله‌های تولید شده به روش پالتروژن که بیشترین سختی و مقدار جذب انرژی را در میان لوله‌های مطرح شده دارند، اما یک حالت شکست غیر متقارن وابسته به تقسیمات طولی لوله در آنها ایجاد می‌شود. در نتیجه، این لوله‌های می‌توانند به عنوان گزینه مناسب‌تر در ساختارهای جذب انرژی استفاده شوند.

¹ Composite
² Fiber
³ Matrix
⁴ Temperature
⁵ Humidity

پس از انجام مدل‌سازی در نرم افزار به اعتبار سنجی این روش پرداخته که برای انجام این کار به ساخت نمونه به صورت تجربی پرداخته و در بررسی‌های انجام شده مشخص شد که مدل‌سازی دارای دقت مناسبی در مقایسه با حالت تجربی بوده است. در این مقاله تغییر پارامترهایی نظیر قطر نمونه، زاویه انتهایی نمونه، شکل هندسی انتهایی نمونه و ارتفاع نمونه در میزان جذب انرژی، تخریب و مقدار نیرو در ناحیه 1 نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مدل سازی عددی

انسیس نرم‌افزار قدرتمند و شبیه‌ساز ساده‌ای می‌باشد که قدرت توانایی یک طراحی معتبر و استاندارد را به مهندسی می‌دهد تا ایده‌هایشان را بر روی صفحه کامپیوتر پیاده کنند. با به کار بردن این نرم‌افزار مهندسی قادر به طراحی و تولید محصولاتی با کیفیت بهتر در زمانی کمتر خواهند بود.

در این پژوهش از المان 3D SOLID 164 برای مدل‌سازی استفاده شده است، این المان دارای 8 گره و دارای درجه آزادی جابه‌جایی، سرعت و شتاب در صفحه مختصات می‌باشد. همچنین این المان برای مسائل دینامیکی صریح³ استفاده می‌شود. خروجی‌های المان تنش و کرنش در جهات مختلف، تنش و کرنش اصلی، تنش معادل، کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک و ... می‌باشد. همچنین از مدل ماده CODAM برای ایجاد خواص جسم استفاده شده است. این مدل ماده علاوه بر خواص ارتوتروپیک⁴ دارای خواص استحکام برشی، استحکام کششی طولی، استحکام کششی عرضی و استحکام فشاری عرضی است که به انجام مدل‌سازی دقیق‌تر کمک می‌کند. بر همین اساس جدول 1 خواص مربوط به کامپوزیت با مدل ماده CODAM، که در نرم افزار به عنوان خواص ماده می‌باشد وارد گردید [24-25].

بعد از اتمام مدل‌سازی به قسمت Meshing رفته و به شبکه‌بندی مدل پرداخته که با توجه به هندسه مسئله مورد تحقیق از نوع شبکه بندی Hex / Sweep استفاده شده است. با توجه به کامپیوتر مورد استفاده شکل مورد نظر را به قسمت کوچکتر تقسیم کرده تا بتوان تحلیل را انجام داد (شکل 1). در این قسمت شکل را با چندین مدل از تعداد مش، مش بندی نموده تا جواب‌های به دست آمده برای ایجاد بهترین مش در قطعه را مورد مقایسه قرار داد (شکل 2). برای یافتن بهترین شبکه بندی مدل را با چند تعداد از مش بندی به اجرا در آورده تا به منظور رسیدن به یک حالت پایدار از این نظر که تعداد مش باعث عوض شدن در نتیجه نگردد بررسی گردید. بدین منظور 4 حالت از تعداد المان را به اجرا در آورده که در شکل 3 مشاهده می‌شود با توجه به نمودارهای حاصل مشخص شد که بین المان 80000 و 90000 تغییر بسیار کمی در نمودار شتاب-جابه‌جایی وجود دارد. این انتخاب تعداد مش بر اساس مقدار شتاب تا لحظه قبل شکست در نمونه و بعد از شکست نمونه انتخاب گردید. همانطور که در شکل 3 مشخص است مقدار شتاب بین دو تعداد المان 80000 و 90000 کم بوده و همچنین در لحظه بعد از شکست دو نمودار تعداد المان تقریباً در یک سطح می‌باشند بنابراین تعداد مش برای شبکه بندی قطعه را 80000 گرفته شد. البته این تعداد شبکه بندی، برای نمونه آزمایش معیار انتخاب شد و برای نمونه‌هایی که از نظر ابعاد هندسی با نمونه معیار مغایرت دارند اندازه ابعاد المان با اندازه ابعاد المان نمونه معیار یکسان در نظر گرفته شد. بدین منظور که با تغییر ابعاد نمونه تعداد شبکه بندی تغییر کرده ولی اندازه المان ثابت مانده است.

دیوید و جانسون [18] تاثیر نرخ کرنش بر مکانیزم شکست و جذب انرژی عضوهای کامپوزیتی پلیمری را تحت بارگذاری محوری بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، از یک روش مدل‌سازی عددی که قبلاً برای مدل‌سازی رفتار له‌شدگی شبه استاتیکی طراحی شده بود برای بررسی رفتار له‌شدگی دینامیکی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که روش‌های عددی مطرح شده در این مقاله، می‌تواند در آینده برای توسعه یک پایگاه داده جامع از خواص جذب انرژی مواد کامپوزیتی و همچنین طراحی عددی معتبر این اجزا، استفاده گردد.

انصاری و همکاران [19] پژوهشی در رابطه با رفتار کامپوزیت‌ها در سرعت پایین و بالا انجام داده‌اند. این پژوهش در ارتباط با نفوذ و سوراخ شدن کامپوزیت می‌باشد. در این پژوهش عددی از کد اتودین¹ برای تحلیل ضربه در طول ضربه استفاده شده است. در انتها نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. همچنین در این تحقیق سرعت محدود بالستیک به دلیل افزایش طول صفحه کامپوزیت کاهش می‌یابد. نتایج عددی کنونی برای حد بالستیک، الگوی آسیب، روند تغییرات حد بالستیک و سرعت باقی مانده، با نتایج موجود در این تحقیق توافق خوبی دارند.

حاتمی و همکاران [20] پژوهشی در رابطه با بررسی عددی و تجربی شبکه‌های دیواره نازک لوله تحت بار ضربه‌ای محوری سرعت پایین داشته‌اند. در این پژوهش از دو نوع جاذب انرژی یکی $a=0$ و دیگری $a=90$ درجه استفاده شده است. مقدار ارتفاع سقوط برای له‌شدگی مقایسه شده است و همچنین اثر جاذب چند لایه به صورت تجربی به دست آمد.

مک‌گرگور و همکاران [21] یک مکانیک آسیب پیوسته بر اساس مدل ماده صریح در المان محدود (CODAM) نرم افزار ال اس دینا را برای این تحقیق مورد استفاده قرار داده‌اند، که برای جواب‌های کشش و فشار کامپوزیت‌های نواری استفاده شده است. توانایی پیش بینی مدل اعتبار سنجی شده (با مدل تجربی دینامیکی)، انتشار آسیب، تحولات شکست و جذب انرژی توافق خوبی با نتایج تجربی را نشان داده است. در این مقاله انتشار خسارت، مشخصات جابه‌جایی نیروی جاذبه و گرایش جذب انرژی خاص، کاملاً منطبق بود.

ژیاو و همکاران [22] پژوهشی در رابطه با کامپوزیت‌های نواری پیچیده شده تحت بار محوری داشته‌اند. در مطالعات قبلی شبیه‌سازی‌های خرد شدن محوری لوله‌های کامپوزیت نواری که سبب تولید خم شدگی کلی شده بود بررسی گردیده است. این نتایج با رفتار پایدار خرد شدن، در آزمایشات ناسازگار بود. نتایج مدل پیشرفته CODAM پیشرفت قابل توجهی را در پیش‌بینی خرد شدن لوله نشان دادند. شبیه‌سازی با استفاده از مدل توسعه یافته CODAM موجب ایجاد مورفولوژی‌های تقریباً واقعی‌تر و همبستگی خوب با توجه به پاسخ نیروی جابه‌جایی و مقدار جذب انرژی شد.

مهربانی یگانه و همکارانش [23] تاثیر هندسه نفوذ کننده بر فرایند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/پوکسی با دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی و اجیوال² مورد مطالعه قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که نفوذ کننده اجیوال با شعاع کالیبر 2.5 به نیروی کمتری برای نفوذ کامل نیازمند است و در مقایسه انرژی جذب شده، نفوذ کننده مخروطی 37 درجه بیشترین انرژی را برای نفوذ کامل نیاز دارد. همچنین طول دماغه بیشتر، افزایش جابجایی تا نفوذ کامل را به همراه دارد.

³ Explicit
⁴ Orthotropic

¹ Autodyn
² Ogival

ضربه‌ای وارده بود. با رسیدن نیرو به حداکثر مقدار خود در ناحیه اول، شکست نمونه، شروع می‌شود. در ناحیه 1 نمودار یک افت کوچک مشاهده می‌شود که به دلیل حذف المان‌های در زیر ضربه زنده اتفاق افتاده و باعث یک افت کوچک در نمودار شده است. دومین ناحیه، بخشی از نمودار است که در آن تخریب نمونه اتفاق می‌افتد. این ناحیه، دقیقاً از نقطه اوج نمودار در ناحیه اول شروع می‌شود و تا اتمام انرژی ضربه، ادامه پیدا می‌کند. تخریب نمونه در این ناحیه رخ می‌دهد که این تخریب منجر به جذب کامل انرژی ضربه می‌شود (شکل 4). جذب انرژی ضربه زنده در این مرحله توسط نمونه، باعث کاهش سرعت ضربه زنده و در نهایت موجب کاهش شتاب ضربه زنده در طی روند آزمایش ضربه می‌شود تا جایی که تمام انرژی، توسط مکانیزم تخریب در نمونه، جذب شده و ضربه زنده متوقف شود و نیرو در نمودار نیرو-جابجایی، به سمت صفر، نزول می‌کند. در شکل 5 مراحل تخریب نمونه در طی آزمون مشاهده می‌شود.

3- مدل سازی تجربی

یکی از آزمون‌های مهم در تعیین رفتار لوله‌های کامپوزیتی، روش آزمون ثقلی با استفاده از دستگاه سقوط وزنه است. این دستگاه، با طرح‌های مختلف در اعمال ضربه با سرعت کم کاربرد بسیار زیادی دارند. این نوع آزمایش با تغییرات سرعت کرنش به سادگی قابل انجام است و جزو آزمایش‌های کم هزینه است. هرچند استفاده از این روش برای افزایش حد بالای سرعت کرنش، هنگامی که سرعت به طور مستقیم به ارتفاع سقوط وابسته است، مشکل است.

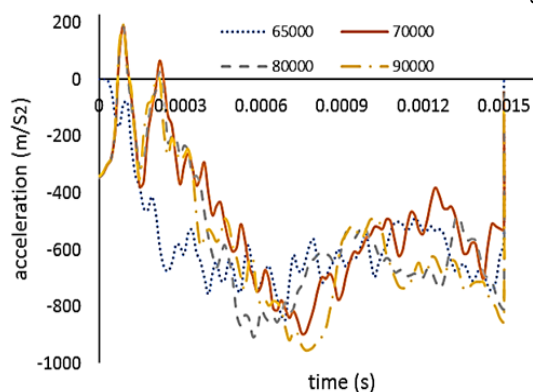


Fig. 3 Acceleration-time diagram for number of element

شکل 3 نمودار شتاب-زمان برای تعداد المان

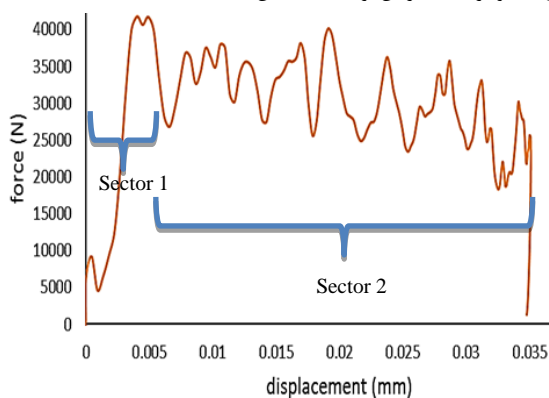


Fig. 4 force-displacement diagram for test sample criterion

شکل 4 نمودار نیرو جابه‌جایی برای نمونه آزمایش معیار

تمامی تماس‌هایی که در این تحقیق استفاده شده در قسمت Surface to Surf با توجه به الگو شبیه‌سازی شده می‌باشد. الگوریتم مورد استفاده در این قسمت از الگوریتم توسعه داده شده Taylor & Flanagan (1989) می‌باشد [26]. از خواص این نوع قید تماسی می‌توان به به‌روز رسانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی گفت و در آخر به به‌روز رسانی بقیه موارد ایجاد شده در قطعه پرداخته می‌شود.

Table 1. composite tube properties [24-25]

جدول 1 خواص لوله کامپوزیتی [24-25]

مقدار	علامت اختصاری	نام و واحد
2200	P	چگالی (kg/m ²)
8.27	E1	مدول الاستیک (Gpa)
38.6	E2=E3	
4	G23=G13	مدول برشی (Gpa)
4	G12	
0.15	V12	ضریب پواسون
0.08	V13=V23	
130	S12	استحکام برشی (Mpa)
1062	S1	استحکام کششی (Mpa)
1062	S2	
150	C2	استحکام فشاری (Mpa)

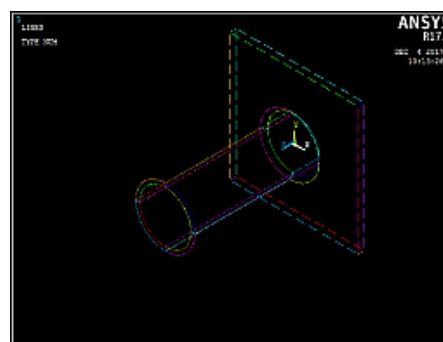


Fig. 1 Sample grid of numerical test

شکل 1 تقسیم بندی نمونه آزمایش عددی

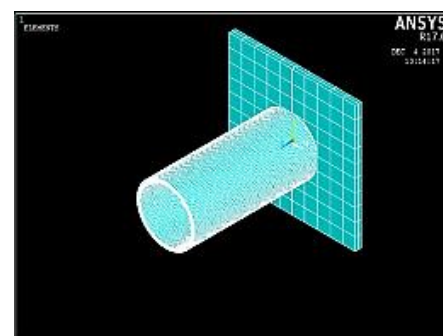


Fig. 2 Sample meshing of numerical test

شکل 2 شبکه بندی نمونه آزمایش عددی

برای به دست آوردن نمودار نیرو-جابجایی از حاضر جرم ضربه زنده در شتاب نیرو و با دو بار انتگرال‌گیری از شتاب جابه‌جایی حاصل شد. نمودارهای حاصله دارای دو ناحیه هستند. اولین ناحیه، بخش ابتدایی نمودار است که در آن نیرو با شیب تند، شروع به افزایش کرده تا به نقطه اوج نمودار برسد. دلیل افزایش ناگهانی نیرو در این ناحیه، مقاومت جسم در برابر نیروی

وزن الیاف، ماتریس ساخته شد. ماتریس حاصل، با ترکیب رزین اپوکسی و هاردنر و مخلوط کردن این دو به مدت 5 دقیقه طبق سفارش شرکت سازنده، ساخته شد. پس از آن، الیاف به دور مندرل مقوایی پیچیده شد. در هر لایه، ماتریس ساخته شده، به صورت دستی توسط قلم‌مو، به الیاف بافته شده اضافه شد. در هنگام پیچش الیاف به صورت دستی، وزنه‌ای بر روی الیاف، قرار داده شد تا به اندازه 50 نیوتن به الیاف، پیش‌بار اعمال شود. در شکل 6 الیاف، رزین و نحوه پیچش الیاف نشان داده می‌شود. نمونه‌های ساخته شده، برای خشک شدن، در دستگاه چرخان لوله کامپوزیتی دانشگاه تفرش قرار داده شد. پس از مدت زمان تقریبی 2 ساعت، نمونه از دستگاه خارج شده و در دمای محیط، به مدت 8 ساعت قرار داده شدند تا به طور کامل پخته شوند. پس از پخت کامل، نمونه‌ها به اندازه ابعاد مورد نیاز جهت انجام آزمایش، بریده شدند. یک انتهای نمونه‌ها برای سهولت ایجاد تخریب پیش‌رونده در طول آزمایش ضربه، به وسیله دستگاه ماشین کاری، به اندازه 45 درجه، یخ زده شد. انتهای دیگر نمونه‌ها با دستگاه ماشین کاری، صاف شد.

3-2- آزمایش بر نمونه تجربی

پس از بستن نمونه بر روی فیکسچر متصل به دستگاه سقوط وزنه دانشگاه تفرش، مقدار 50 کیلوگرم وزنه بر روی دستگاه قرار داده شد تا بتواند در ارتفاع مشخص، میزان انرژی لازم برای تخریب نمونه را فراهم آورد. پس از رها شدن وزنه از ارتفاع مشخص و اعمال ضربه به نمونه ساخته شده به وسیله سنسور شتاب 2000g اطلاعات ضربه با فیلتراسیون 1000 هرتز به ثبت کننده داده انتقال یافته و پس از خواندن این اطلاعات، ثبت کننده داده آن را به کامپیوتر انتقال می‌دهد (شکل 7).



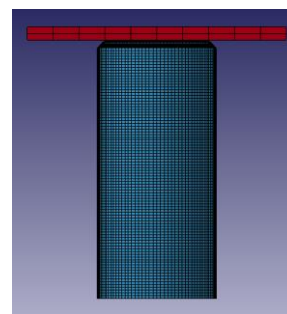
(a)



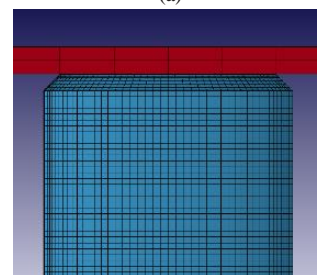
(b)

Fig. 6 (a) Machine rotary for make sample (b) made sample

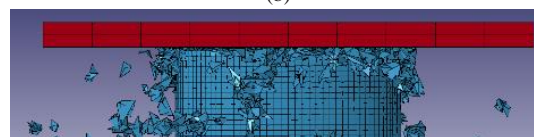
شکل 6 (a) دستگاه چرخان برای آماده سازی نمونه - (b) نمونه ساخته شده برای هر آزمایش داده‌های شتاب نسبت به زمان برداشته شده و از طریق ثبت کننده داده، در رایانه نمایش داده شد و سپس یک فایل داده در نرم افزار اکسل تهیه شد تا نمودار شتاب-زمان مطابق شکل 7 الف رسم شود. در



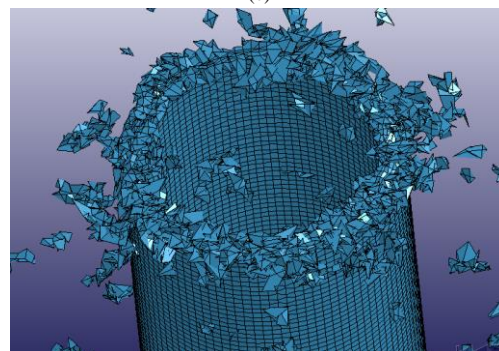
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 (a & b) Modeling Sample, (c) Sample at impacting moment, (d) sample after impacting

شکل 5 (a) و (b) نمونه مدل سازی شده - (c) نمونه در هنگام اعمال ضربه - (d)

نمونه بعد از اعمال ضربه

3-1- تهیه مواد

برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی، از الیاف شیشه مدل E با چگالی سطحی 400gr/m² که دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان بود استفاده شد. از خواص این الیاف می‌توان به استحکام بالا، قیمت مناسب، در دسترس بودن و همچنین آغشته سازی خوب با رزین‌های مختلف برشمرد. ماتریس از نوع رزین اپوکسی با نام تجاری ایپون 828¹ انتخاب شد. همچنین، از سفت کننده سیکلو آلیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف 205² استفاده شده است. نسبت مخلوط رزین به سفت کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده، 2 به 1 است.

برای ساخت نمونه‌ها، در ابتدا طول مورد نیاز از الیاف بریده شد. سپس وزن مقدار الیاف مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها، اندازه گیری شده و هم اندازه

¹ Epone 828

² Epikure F-205

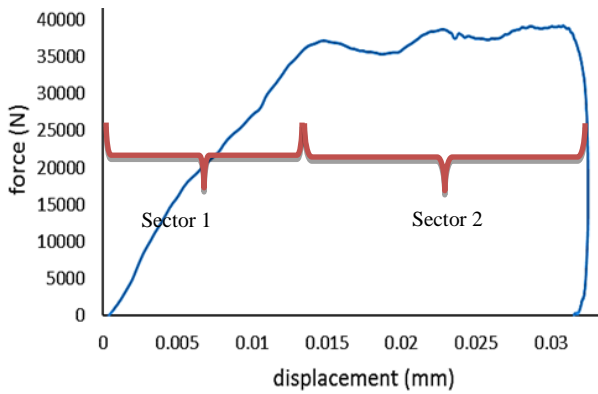


Fig. 8 Force- Displacement diagram

شکل 8 نمودار نیرو- جابه‌جایی

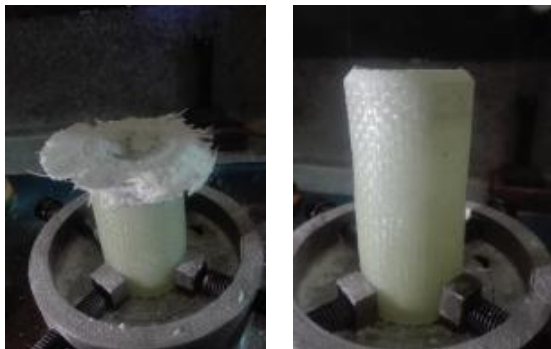


Fig. 9 Sample before impacting and Sample after impacting

شکل 9 نمونه قبل از اعمال ضربه و نمونه بعد از اعمال ضربه

4- اعتبار سنجی مدل‌سازی عددی

در دنیای امروز، پیش‌بینی رفتار لوله‌های کامپوزیتی، به جهت افزایش روزافزون کاربردشان در صنعت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پیش‌بینی، اصولاً با طراحی و ساخت نمونه‌های کوچک‌تر و انجام آزمایش‌های تجربی امکان‌پذیر است. اما در پاره‌ای از موارد، به جهت هزینه‌بر و زمان‌بر بودن آزمون‌های تجربی، آزمایش‌های عددی با شرایط مشابه، طراحی و اجرا می‌گردند. در این پژوهش نیز به اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی انجام شده با آزمایش تجربی پرداخته شده است. بدین منظور در شکل 10 نمودار نیرو- جابه‌جایی آزمایش عددی نمونه با قطر داخلی 40 میلی‌متر (آزمایش معیار) و آزمایش تجربی مشابه آورده شده است.

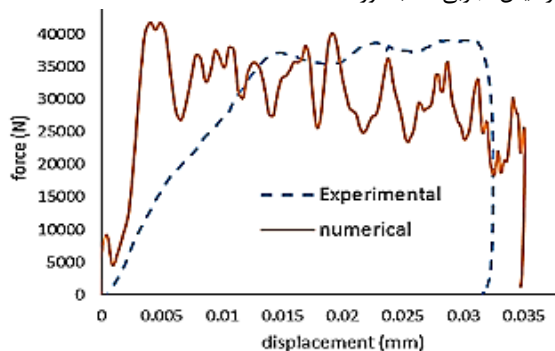
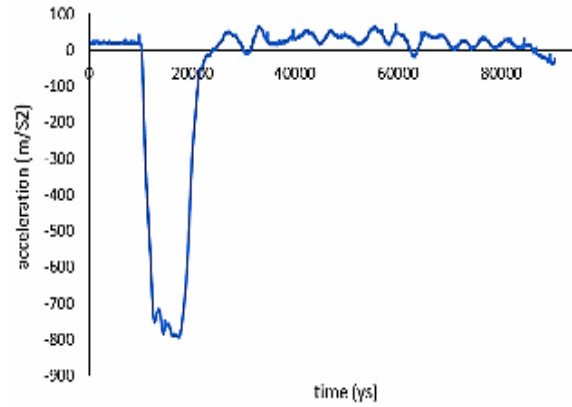


Fig. 10 Comparison of Force- Displacement diagram of experimental and numerical results in the samples with 40mm diameter

شکل 10 مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی نتایج تجربی و عددی نمونه های با قطر 40 میلی‌متر

نمودار شتاب-زمان به دست آمده، فقط قسمتی از داده‌ها مربوط به روند برخورد ضربه زن با لوله‌ها بودند (قسمت دره‌ای شکل در نمودار). داده‌های این قسمت، جدا شده و از این داده‌ها نمودار نیرو- جابه‌جایی استخراج شد (شکل 8). شکل 9 نمایش بستن نمونه در فیکسچر و نمایش نمونه بعد از ضربه را نشان می‌دهد.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 (a) acceleration-time diagram, (b) data lager, (c) drop weight machine for Tafresh university

شکل 7 (a) نمودار شتاب- زمان - (b) ثبت کننده داده‌ها- (c) دستگاه سقوط وزنه دانشگاه تفرش

2 برای آزمایش تجربی، مقدار مثبتی است و نیرو در این ناحیه با شیب ملایم، افزایش می‌یابد تا تمام انرژی ضربه جذب شده و تخریب نمونه به پایان برسد. چرا که در آزمون تجربی، با شروع تخریب نمونه، لایه‌های میانی، بر روی دیواره نمونه، تجمع پیدا کرده و جهت ادامه روند تخریب، به نیروی بیشتری نیاز است.

در همین راستا برای اعتبار سنجی مدل‌سازی، آزمایش دیگری برای نمونه با قطر داخلی 30 انجام داده و با آزمایش از نمونه‌های تجربی مورد مقایسه قرار داده شد (شکل 13). شکل 14 مقدار بیشترین نیرو در ناحیه 1 و شکل 15 مقدار تخریب نمونه می‌باشد که نتایج حاصل نشان دهنده آن است که بیشترین مقدار نیرو در ناحیه 1 برای آزمایش عددی در مقایسه با آزمایش تجربی دارای 9 درصد خطا نسبت به هم بوده است. همچنین برای تخریب نمونه نیز دارای 9.5 درصد خطا نسبت به آزمایش عددی با تجربی بوده است.

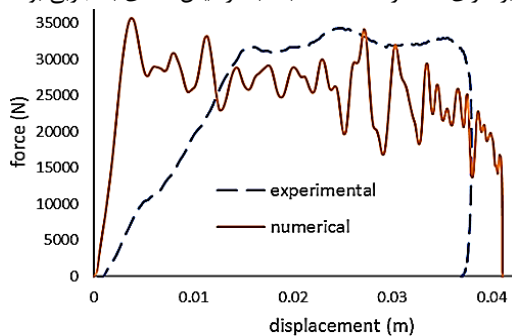


Fig. 13 Comparison of Force- Displacement diagram of experimental and numerical results in the samples with 30mm diameter

شکل 13 مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نتایج تجربی و عددی نمونه های با قطر 30 میلیمتر

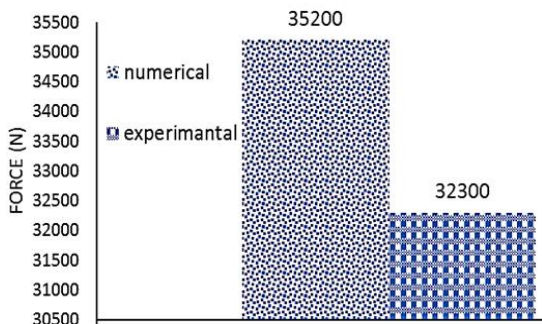


Fig. 14 Comparison of force value in first area of experimental and numerical results in the samples with 30mm diameter

شکل 14 مقایسه مقدار نیرو در ناحیه 1 نتایج تجربی و عددی نمونه های با قطر 30 میلیمتر

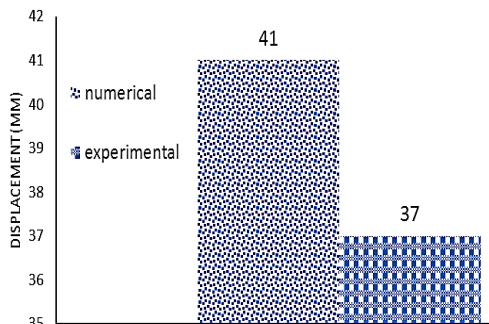


Fig. 15 Comparison of destruction value of experimental and numerical results in the samples with 30mm diameter

شکل 15 مقایسه مقدار تخریب نتایج تجربی و عددی نمونه های با قطر 30 میلیمتر

همانطور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، مقدار بیشترین نیرو در ناحیه 1 برای آزمایش عددی و برای آزمایش تجربی با یکدیگر 9 درصد اختلاف دارند. همچنین با بررسی میزان تخریب نمونه‌ها در دو آزمون عددی و تجربی در شکل 12، مشخص شد که مقدار که این مقادیر نیز حدود 6 درصد اختلاف نسبت به هم داشتند.

در شکل 10 مشاهده شد که نمودار آزمایش عددی در ناحیه 1، با شیب بیش‌تری نسبت به آزمایش تجربی، صعود می‌کند. علت این مسئله پس از بررسی روند شبیه‌سازی نمونه عددی و همچنین روند ساخت و آزمایش نمونه تجربی، مشخص شد. جهت آماده‌سازی نمونه برای آزمون تجربی، برای ایجاد زاویه در انتهای نمونه از روش ماشین‌کاری به وسیله دستگاه تراش بر روی نمونه بهره برده شد. این امر سبب ایجاد جدایش بسیار ریز میان الیاف و ماتریس در قسمت پخ خورده نمونه گشت. به همین دلیل در هنگام اعمال نیروی ضربه‌ای بر انتهای جسم، تا میزان 12 میلی‌متر جابه‌جایی، میزان نیروی وارده، با شیب ملایم افزایش پیدا کرده تا به منطقه ایجاد شکست و شروع تخریب برسد. اما در شبیه‌سازی صورت گرفته برای نمونه، به دلیل یکپارچگی و عدم وجود نقص در قسمت پخ خورده نمونه، نمودار فقط تا انتهای تخریب قسمت پخ خورده، حالت صعودی داشته و شیب نمودار تندتر است. البته شایان ذکر است روش ساخت دستی نمونه‌ها نیز در حصول این نتیجه بی‌تاثیر نیست.

یکی از نکات قابل توجه در مقایسه نمودار آزمایش تجربی و عددی در شکل 10، شیب کلی نمودار در ناحیه دوم است. برای نمودار آزمایش عددی، مقدار این شیب، منفی است. بدین معنی که با پیش‌روی تخریب در ناحیه 2، مقدار نیروی متوسط له‌شدگی، با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. چرا که در طول تخریب، با حذف المان‌های تحت ضربه، نیروی لازم برای تخریب ادامه نمونه کاهش می‌یابد. اما همانطور که ملاحظه می‌شود، شیب نمودار در ناحیه

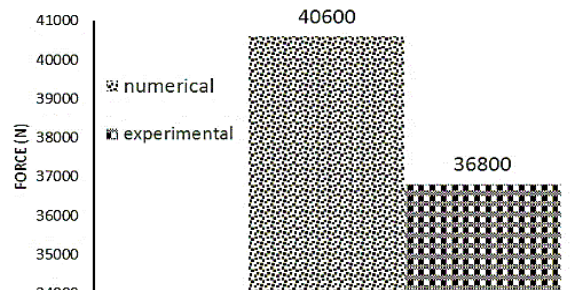


Fig. 11 Comparison of force value in first area of experimental and numerical results in the samples with 40mm diameter

شکل 11 مقایسه مقدار نیرو در ناحیه 1 نتایج تجربی و عددی نمونه های با قطر 40 میلیمتر

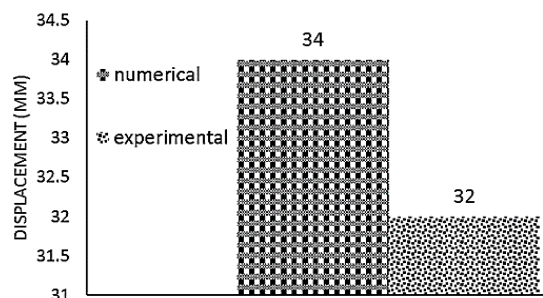


Fig. 12 Comparison of destruction value of experimental and numerical results in the samples with 40mm diameter

شکل 12 مقایسه مقدار تخریب نتایج تجربی و عددی نمونه های با قطر 40 میلیمتر

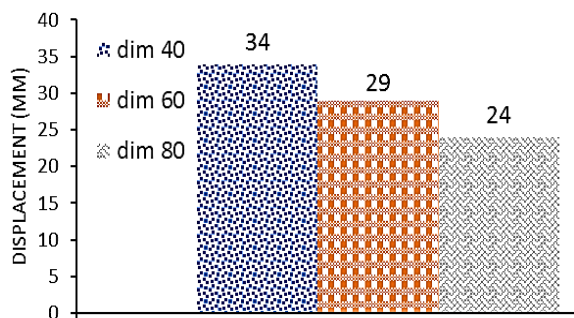


Fig. 18 Destruction value in different diameter of sample

شکل 18 مقدار تخریب در قطرهای مختلف نمونه

در شکل 16، 17 و 18 مشاهده می‌شود که با افزایش قطر نمونه از 40 میلیمتر تا 60 میلیمتر، میزان تخریب حدود 17.5 درصد کاهش پیدا می‌کند. در حالی تغییر قطر برای این دو نمونه برابر 50 درصد بوده است. اما با افزایش قطر از 60 میلیمتر تا 80 میلیمتر (حدود 33 درصد)، کاهش میزان تخریب برابر 16.8 درصد بود. این مسئله نشان می‌دهد که در قطرهای بالاتر نمونه، افزایش قطر نمونه، تاثیر تغییر قطر میزان جذب انرژی را بیشتر می‌کند.

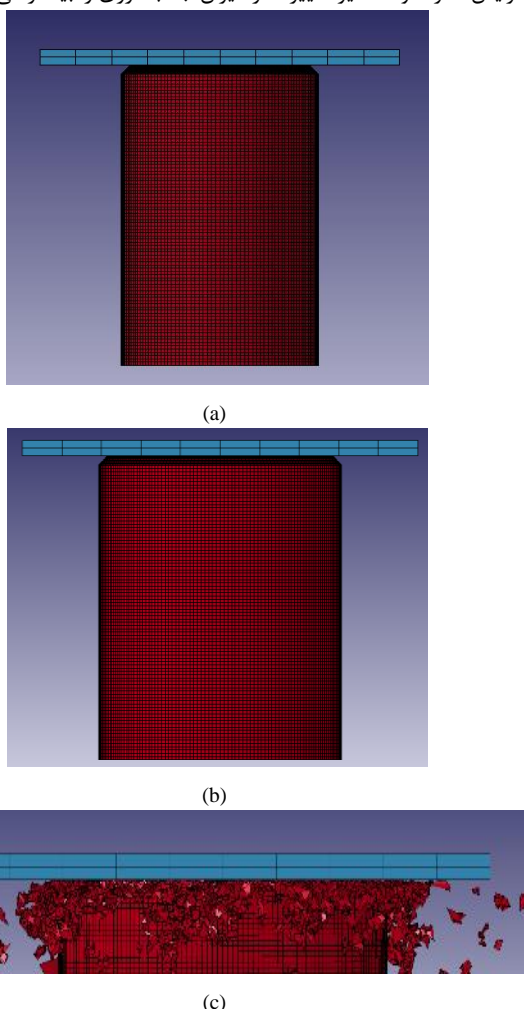


Fig. 19 (a) Sample with an inner diameter of 60, (b) Sample with an inner diameter of 80, (c) Sample impacting with an inner diameter of 80
شکل 19 (a) نمونه با قطر داخلی 60- (b) نمونه با قطر داخلی 80- (c) اعمال ضربه به نمونه با قطر داخلی 80

5- نتایج و بحث تحلیل ضربه

5-1- تاثیر تغییر قطر لوله در نتایج تحلیل عددی

یکی از پارامترهای بررسی شده در این پژوهش تاثیر تغییر اندازه قطر داخلی لوله‌های کامپوزیتی در مقدار تخریب و استحکام این لوله‌ها در برابر ضربه محوری است. در این آزمون قطر داخلی نمونه مرجع 40 میلیمتر در نظر گرفته شد و دو آزمایش دیگر که در آن‌ها قطر نمونه‌ها به ترتیب 60 و 80 میلیمتر بودند طراحی شد تا میزان تاثیر پارامتر قطر داخلی، بر رفتار نمونه‌ها در برابر بار ضربه‌ای بررسی شود. در شکل 16، نمودار نیرو- جابه‌جایی حاصل از اعمال ضربه بر روی نمونه‌ها با قطرهای مختلف، جهت مقایسه آورده شدند. همانطور که در شکل 16 مشاهده می‌شود با افزایش قطر داخلی نمونه‌ها، شیب نمودار نیرو-جابه‌جایی در ناحیه اول تغییری نکرد اما مقدار تخریب نمونه کاهش پیدا کرده است. به بیانی دیگر با افزایش قطر نمونه استحکام نمونه در برابر بارگذاری ضربه‌ای افزایش پیدا کرده که این امر در اثر افزایش سطح مقطع درگیر نمونه در طی ضربه وارده است. نتایج به دست آمده از نیرو در ناحیه یک در شکل 17 و نتایج تخریب نمونه در شکل 18 قابل مشاهده است. همچنین در شکل 19 مراحل تخریب نمونه در طی آزمون مشاهده می‌شود.

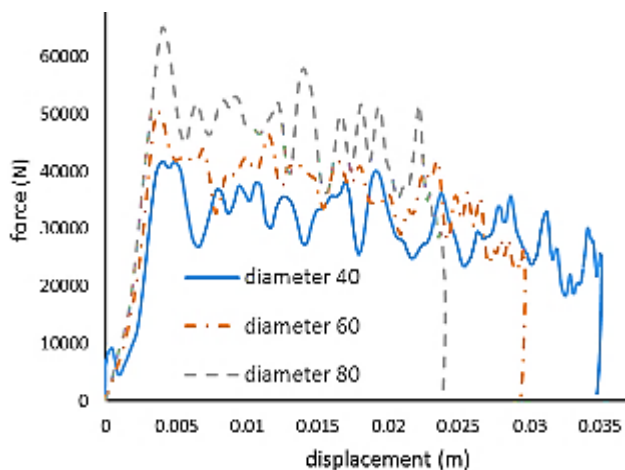


Fig. 16. Force- Displacement diagram in different diameter of sample

شکل 16 نمودار نیرو-جابه‌جایی در قطرهای مختلف نمونه

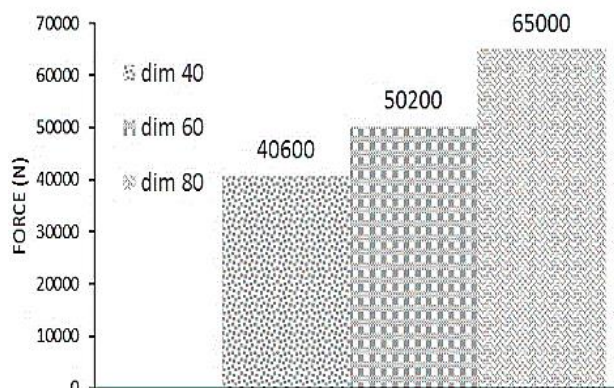


Fig. 17 Force value in first area in different diameter of sample

شکل 17 مقدار نیرو در ناحیه 1 در قطرهای مختلف نمونه

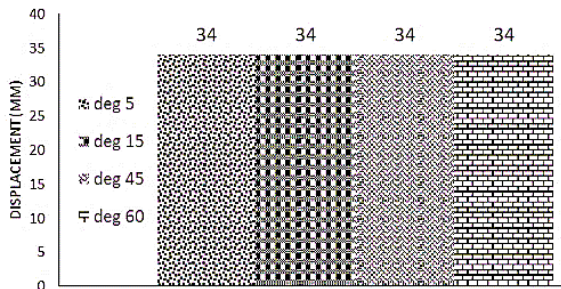


Fig. 22 Destruction value in different end angle samples

شکل 22 مقدار تخریب در نمونه‌ها با زاویه انتهای متفاوت

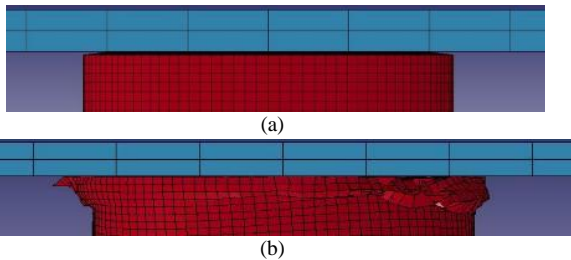


Fig. 23 Sample with an end angle of 5 degree, (a) Sample with an end angle of 5 degree before collision, (b) Sample with an end angle of 5 degree at failure moment

شکل 23 نمونه با زاویه انتهای 5 درجه - (a) نمونه با زاویه انتهای 5 درجه قبل از برخورد - (b) نمونه با زاویه انتهای 5 درجه در لحظه شکست

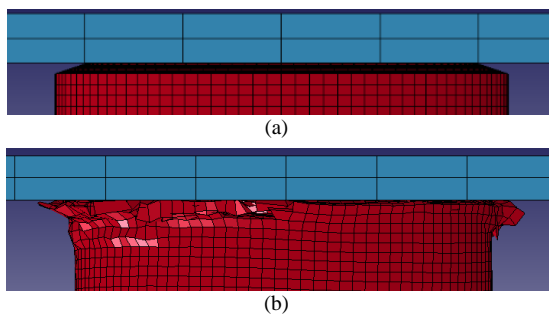


Fig. 24 Sample with an end angle of 15 degree, (a) Sample with an end angle of 15 degree before collision, (b) Sample with an end angle of 15 degree at failure moment

شکل 24 نمونه با زاویه انتهای 15 درجه - (a) نمونه با زاویه انتهای 15 درجه قبل از برخورد - (b) نمونه با زاویه انتهای 15 درجه در لحظه شکست

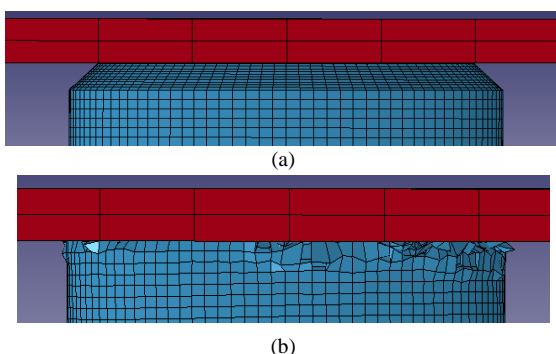


Fig. 25 Sample with an end angle of 45 degree, (a) Sample with an end angle of 45 degree before collision, (b) Sample with an end angle of 45 degree at failure moment

شکل 25 نمونه با زاویه انتهای 45 درجه - (a) نمونه با زاویه انتهای 45 درجه قبل از برخورد - (b) نمونه با زاویه انتهای 45 درجه در لحظه شکست

2-5- تاثیر تغییر زاویه انتهای لوله در نتایج تحلیل عددی

با بررسی مطالعات پیشین در زمینه بارگذاری ضربه‌ای محوری ساختارهای کامپوزیتی، مشخص شد که اکثر محققان، در یک انتهای نمونه‌های آزمایش ضربه، پخ ایجاد می‌کردند. این پخ به طور معمول با زاویه 45 درجه در یک انتهای نمونه توسط محققان، ایجاد شد تا نمونه به صورت مود آسیب پیش‌رونده¹، تخریب گردد و انرژی وارده، به راحتی توسط نمونه، جذب گردد. در پژوهش حاضر نیز، یک انتهای تمام نمونه‌ها با زاویه 45 درجه پخ زده شد. در این قسمت از پژوهش، تغییر زاویه انتهای لوله کامپوزیتی در رفتار لهدگی نمونه‌ها تحت بار ضربه‌ای محوری بررسی گردید. نتایج به دست آمده در قالب نمودار نیرو- جابه‌جایی و مقایسه با آزمایش معیار، در شکل 20 آورده شده است. نمونه‌ها با 4 زاویه مختلف در انتهای نمونه، 5، 15، 60 و نمونه معیار که با زاویه 45 درجه می‌باشد پخ شده شد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با نزدیک شدن به زاویه انتهای صفر درجه، حداکثر نیرو در ناحیه 1، افزایش پیدا کرد. همچنین مقدار شیب در این ناحیه با کاهش زاویه انتهای نمونه، دچار افزایش شد. نتایج این آزمایش در شکل 21 برای نیرو در ناحیه 1 و برای تخریب نمونه در شکل 22 آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه انتهای لوله مقدار نیرو و مقدار شیب در ناحیه 1 کاهش یافته است. علت افزایش شیب نمودار در ناحیه اول و همچنین کوتاه شدن طول ناحیه اول نمودار، با کاهش زاویه انتها، به سبب کاهش ارتفاع ناحیه پخ خورده و در نتیجه تخریب سریع این ناحیه از نمونه است. در شکل 23، 24، 25 و 26 مراحل تخریب نمونه در طی آزمون مشاهده می‌شود.

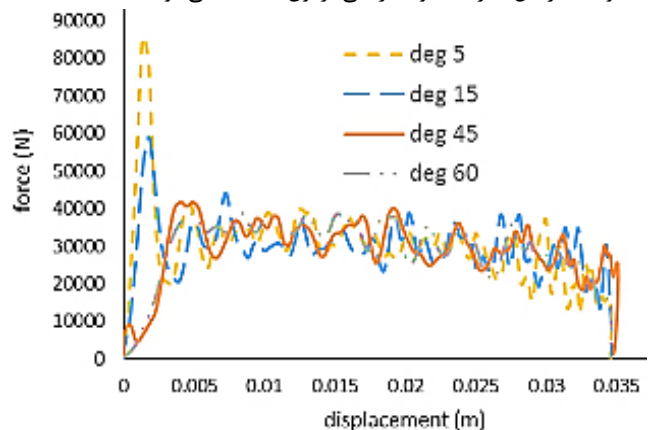


Fig. 20 Force- Displacement diagram in different end angle of sample test

شکل 20 نمودار نیرو-جابه‌جایی در زاویه انتها مختلف نمونه

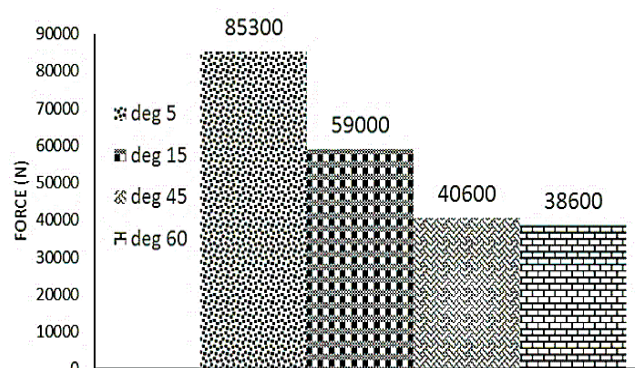


Fig. 21 Force value in first area for different end angle samples

شکل 21 مقدار نیرو در ناحیه 1 برای نمونه‌ها با زاویه انتهای متفاوت

¹ Progressive failier mode

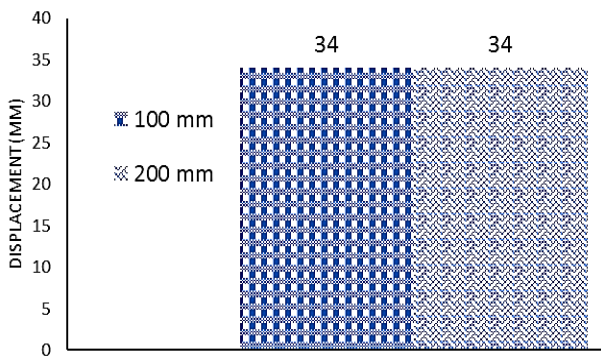
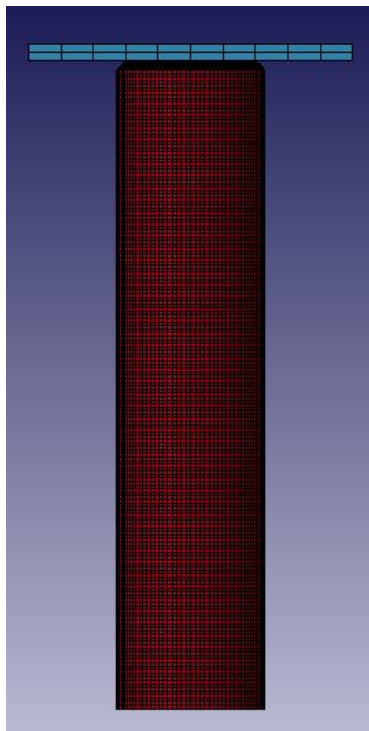
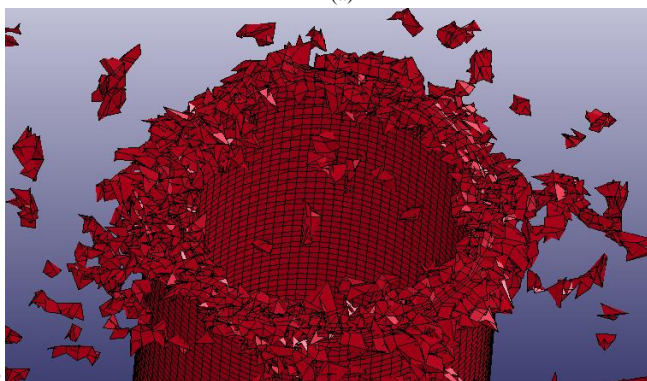


Fig. 29 Destruction value of different height sample

شکل 29 مقدار تخریب برای نمونه با ارتفاع‌های مختلف



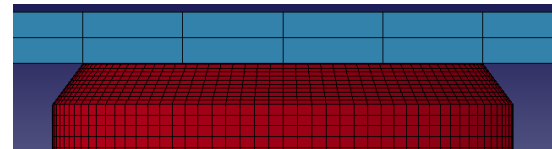
(a)



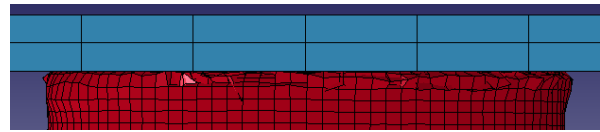
(b)

Fig. 30. (a) Sample with a height of 200 mm, (b) Sample with a height of 200 mm after impacting

شکل 30 (a) نمونه با ارتفاع 200 میلی‌متر- (b) نمونه 200 میلی‌متری بعد از اعمال ضربه



(a)



(b)

Fig. 26 Sample with an end angle of 60 degree, (a) Sample with an end angle of 60 degree before collision, (b) Sample with an end angle of 60 degree at failure moment

شکل 26 نمونه با زاویه انتهای 60 درجه- (a) نمونه با زاویه انتهای 60 درجه قبل از برخورد- (b) نمونه با زاویه انتهای 60 درجه در لحظه شکست

5-3- تاثیر تغییر ارتفاع در نتایج تحلیل عددی

از پارامترهای بررسی شده در لوله‌های کامپوزیتی تاثیر ارتفاع نمونه در پاسخ به ضربه سرعت پایین می‌باشد. نمونه با ارتفاع 200 میلیمتر تحت بارگذاری دینامیکی محوری به صورت عددی با شرایط مشابه آزمایش معیار بررسی شد. همانور که در شکل 27 مشاهده می‌شود.

تغییر ارتفاع از 100 میلیمتر به 200 میلیمتر تغییری در میزان تخریب و بیشترین مقدار نیرو در ناحیه 1 ایجاد نکرده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش برای نیرو در ناحیه 1 در شکل 28 و برای تخریب نمونه در شکل 29 آورده شده است. به بیانی دیگر با تغییر ارتفاع، تغییر محسوسی در رفتار لوله کامپوزیتی در طی آزمون ضربه محوری مشاهده نشد. در شکل 30 مراحل تخریب نمونه در طی آزمون مشاهده می‌شود.

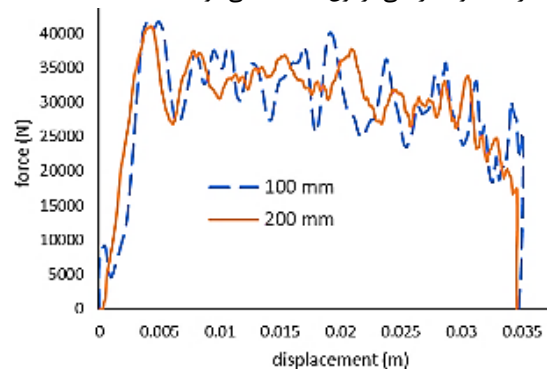


Fig. 27. Force- Displacement diagram in different heights

شکل 27 نمودار نیرو-جاب‌جایی برای ارتفاع‌های مختلف

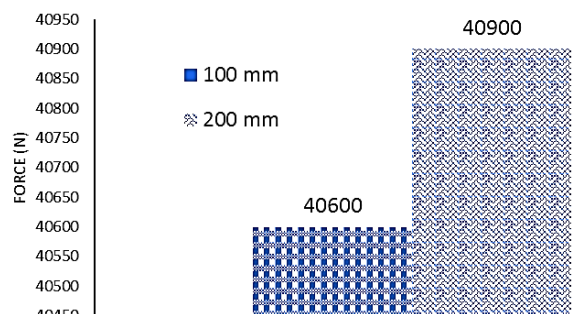


Fig. 28 Force value for different heights in first area of sample

شکل 28 مقدار نیرو در ناحیه 1 برای نمونه با ارتفاع‌های مختلف

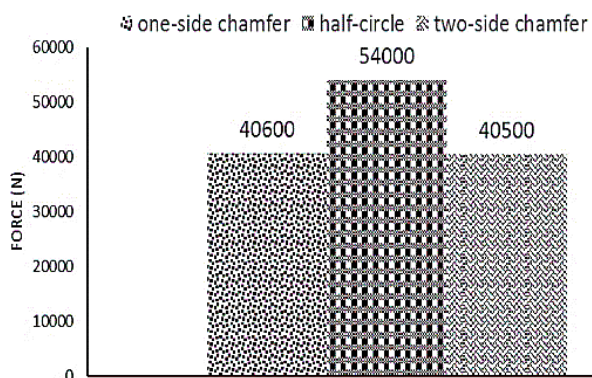


Fig. 32. Force value in first area for testing the end shape of the sample
 شکل 32 مقدار نیرو در ناحیه 1 برای آزمایش شکل انتهای نمونه

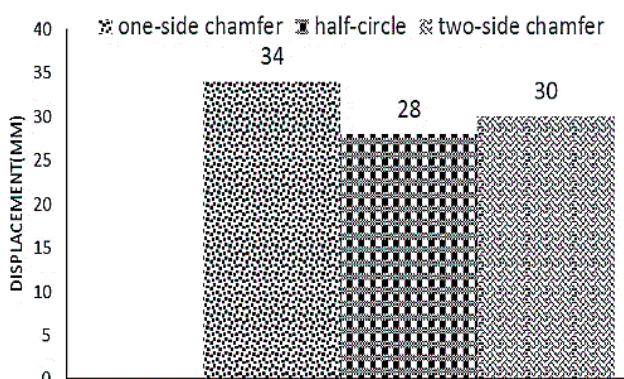


Fig. 33 Destruction value for testing the end shape of the sample
 شکل 33 مقدار تخریب برای آزمایش شکل انتهای نمونه

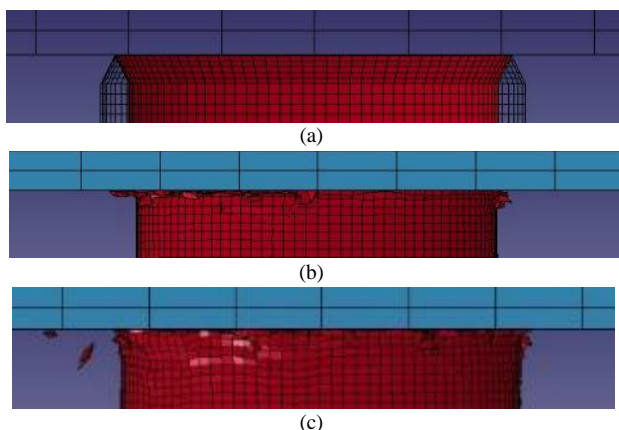


Fig. 34 Sample with a 60 degree double-sided beveled geometric shape, (a) view of bevel type, (b) collision moment with impactor, (c) failure moment in sample with a 60 degree double-sided beveled

شکل 34 نمونه با شکل هندسی پخ دو طرفه 60 درجه- (a) نمای از نوع پخ- (b) لحظه برخورد با ضربه زننده- (c) لحظه شکست در نمونه با زاویه پخ دو طرفه

6- نتیجه‌گیری

- با مدل‌سازی انجام شده توانسته شد به مدل‌سازی ساده‌تری برای بررسی ضربه بر روی کامپوزیت دست پیدا کرد که در عین سادگی نزدیک به جواب‌های تجربی باشد. لذا ایجاد یه مدل‌سازی ساده برای به دست آوردن نتایج قابل قبول از بزرگترین نتایج این تحقیق می‌باشد.

4-5- تاثیر تغییر شکل پخ انتهای لوله در نتایج تحلیل عددی

مطابق پژوهش‌های پیشین محققین یک انتهای تمام نمونه‌ها با زاویه 45 درجه پخ زده شد. جهت بررسی تاثیر تغییر شکل انتهای نمونه، انتهای نمونه به صورت پخ دو طرفه 60 درجه و به شکل نیم دایره ساخته شد. مقایسه نمودار نیرو-جاب‌جایی آزمایشات با آزمایش معیار در شکل 31 دیده می‌شود. مطابق شکل 31 مشاهده می‌شود که شیب نمودار در ناحیه اول برای نمونه با زاویه انتهای گرد تندتر از نمونه با زاویه پخ دو طرفه و نمونه معیار می‌باشد. چرا که ارتفاع منطقه گرد شده در نمونه با زاویه انتهای گرد برابر 1.5 میلیمتر بوده و ضربه زننده با مقاومت جسم پس از طی این منطقه مواجه شده است. در نتیجه مقدار ماکزیمم نیرو در ناحیه 1 در جابه‌جایی کمتری اتفاق افتاده است. در حالیکه برای نمونه‌های آزمایش معیار و زاویه پخ 60 درجه دو طرفه ارتفاع پخ 3 میلیمتر بوده است و اوج بار پس از جابه‌جایی 3 میلیمتری اتفاق می‌افتد. مقدار بیشترین بار در ناحیه 1 برای آزمایش نیم دایره برابر 54000 نیوتن و در حدود 35 درصد بیشتر از مقدار این پارامتر در مقایسه با دو آزمایش دیگر گزارش شد. به سبب اینکه ضربه زننده در طول تخریب ناحیه گرد با سطح مقطع بیشتری نسبت به دو آزمایش دیگر درگیر است، بنابراین نیروی لازم برای تخریب این منطقه بیشتر می‌باشد. شیب نمودار در ناحیه 1 و بیشترین مقدار نیرو در این ناحیه برای دو آزمایش معیار و پخ دو طرفه تقریباً برابر است و این نشان می‌دهد دو طرفه بودن زاویه انتهای نمونه تاثیر خاصی در روند نمودار در ناحیه 1 ندارد. ولی در ناحیه 2، به سبب اینکه شیب کاهش سطح نمودار در طول تخریب جسم، برای آزمایش پخ دو طرفه کمتر از آزمایش معیار است، مقدار انرژی ضربه بیشتری توسط نمونه آزمایش پخ دو طرفه نسبت به نمونه آزمایش معیار جذب می‌شود و همین مسئله باعث کاهش طول تخریب نمونه آزمایش پخ دو طرفه نسبت به نمونه آزمایش معیار می‌گردد. نتایج کلی این دو آزمایش نشان می‌دهد که گرد کردن یک انتهای نمونه در آزمون ضربه دینامیکی محوری بر روی لوله‌های کامپوزیتی، باعث افزایش نیروی لازم جهت تخریب نمونه و در نتیجه کاهش طول تخریب نمونه خواهد شد. همچنین ایجاد پخ دو طرفه نیز، حدود 16 درصد، میزان تخریب نمونه را کاهش می‌دهد. شکل 32 نیرو در ناحیه 1 و شکل 33 تخریب نمونه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل 34 و 35 مراحل تخریب نمونه در طی آزمون مشاهده می‌شود.

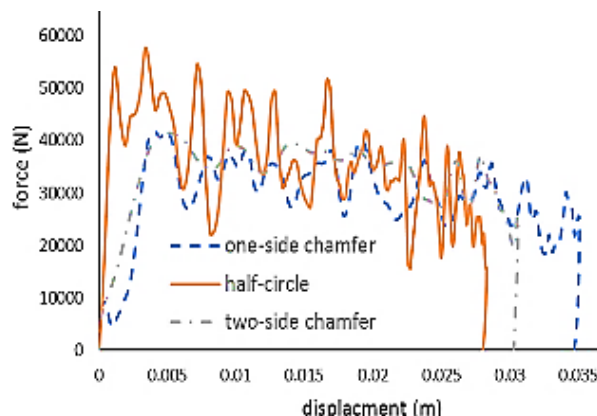


Fig. 31 Diagram force- displacement for testing the end shape of the sample

شکل 31 نمودار نیرو-جاب‌جایی برای آزمایش شکل انتهای نمونه

7- مراجع

- [1] Sadeghi, Mohammad, and Mohammad Hossein Pol., "Experimental investigation of the effect of the addition of carbon nanotubes on the quasi-static punch shear penetration of the laminated glass/epoxy composite", *Modares Mech Eng*, 15,416-424, 2015. (in Persian)
- [2] Pol, M. H., Liaghat, G. H., & Hajiarazi, F., "Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation", *Journal of Composite Materials*, 47(13), 1563-1573, 2013. (in Persian)
- [3] Sadeghi, Mohammad, and Mohammad Hossein Pol., "Experimental studies on the punch shear characterization of glass/epoxy/CNTs laminate nanocomposites", *Polymer Composites*, POLYM COMPOS, 47: 1563-1573, 2017.
- [4] Sadeghi, Mohammad, and Mohammad Hossein Pol., "Investigation of behaviors of glass/epoxy laminate composites reinforced with carbon nanotubes under quasi-static punch shear loading", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 1099636217719223, 2017.
- [5] Rahimi Sharbaf, H. Rahimi, G. H. and Liaghat, G. H., "Experimental study of behavior of filament winding composite pipes with liner using glass fibers and silica nanoparticles under impact loading", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, 2017. (in Persian)
- [6] Pol, Mohammad Hossein, and G. H. Liaghat., "Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles", *Polymer Composites*, 38.1: 205-212, 2017. (in Persian)
- [7] Islamic Farsani, R, Shahrazi Farahani.A., "Investigating the flexural behavior of lattice composite reinforced with multi-wall carbon nanotubes", *Composite Science and Technology* 4 (1): 101-108, 2017. (in Persian)
- [8] Kim, S. W., Kim, E. H., Jeong, M. S., & Lee, I., "Damage evaluation and strain monitoring for composite cylinders using tin-coated FBG sensors under low-velocity impacts", *Composites Part B: Engineering*, 74, 13-22, 2015.
- [9] Nouri, Mohammad Damghani, and Hossein Hatami. "Experimental and numerical study of the effect of longitudinal reinforcements on cylindrical and conical absorbers under impact loading." *Indian Journal of Science and Technology* 7, No. 2 : 199-210, 2014.
- [10] Chiu, L. N., Falzon, B. G., Ruan, D., Xu, S., Thomson, R. S., Chen, B., & Yan, W., "Crush responses of composite cylinder under quasi-static and dynamic loading", *Composite Structures* 131: 90-98, 2015.
- [11] Mahdi, E. and T. A. Sebaey., "An experimental investigation into crushing behavior of radially stiffened GFRP composite tubes", *Thin-Walled Structures* 76: 8-13, 2014.
- [12] Hatami, H., M. Shokri Rad, and A. Ghodsbin Jahromi. "A theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads" *International Journal of Impact Engineering* 109 : 224-239, 2017.
- [13] Jahromi, A. Ghodsbin, and H. Hatami. "Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact" *Thin-Walled Structures* 116 : 1-11, 2017.
- [14] Zhang, P., Gui, L. J., Fan, Z. J., Yu, Q., & Li, Z. K., "Finite element modeling of the quasi-static axial crushing of braided composite tubes", *Computational Materials Science* 73: 146-153, 2015.
- [15] Huang, J., & Wang, X., "Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes", *Composite Structures*, Vol. 91, No. 2, pp: 222-228, 2009.
- [16] Ma, J., & Yan, Y., "Quasi-static and dynamic experiment investigations on the crashworthiness response of composite tubes", *Polym Compos*; 34(37): 1099, 2013.
- [17] Han, H., Taheri, F., Pegg, N., & Lu, Y., "A numerical study on the axial crushing response of hybrid pultruded and $\pm 45^\circ$ braided tubes", *Composite Structures*, Volume 80, Issue 2, Pages 253-264, 2007.
- [18] David, M., & Johnson, A. F., "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.
- [19] Ansari, M. M., & Chakrabarti, A., "Impact behavior of FRP composite plate under low to hyper velocity impact", *Composites Part B: Engineering* 95(Supplement C): 462-474, 2016.

- نتایج نشان داد که با حدود 10 درصد خطا در دو پارامتر بیشترین نیرو در ناحیه 1 و مقدار تخریب نمونه‌های عددی مدل‌سازی شده نسبت به نمونه‌های تجربی، مدل‌سازی انجام شده دارای دقت مناسبی از حالت تجربی می‌باشد.
- بررسی تاثیر تغییر قطر داخلی نمونه‌ها بر نتایج تحلیل عددی، نشان داد که با افزایش قطر داخلی نمونه‌ها از 40 میلیمتر تا 80 میلیمتر، شیب نمودار نیرو-جابجایی در ناحیه اول تغییری نمی‌کند. اما مقدار تخریب نمونه کاهش پیدا کرده است. به بیانی دیگر با افزایش قطر نمونه استحکام نمونه در برابر بارگذاری ضربه‌ای افزایش پیدا کرده که این امر در اثر افزایش سطح مقطع درگیر نمونه در طی ضربه وارده است.
- نتایج تحلیل عددی نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌ها در ساختار نمونه کامپوزیتی، سطح نیروی متوسط نمودار نیرو-جابجایی بالاتر می‌رود در نتیجه می‌توان گفت که افزایش تعداد لایه‌ها در نمونه لوله کامپوزیتی، افزایش استحکام ضربه‌ای آن را به دنبال خواهد داشت.
- برای نمونه‌ها با زاویه انتهایی متفاوت، مشاهده شد که با نزدیک شدن زاویه انتهایی نمونه‌ها به صفر درجه، حداکثر نیرو در ناحیه اول نمودار نیرو-جابجایی، افزایش پیدا کرد. در واقع نتیجه گرفته شد که افزایش شیب نمودار در ناحیه اول و همچنین کوتاه شدن طول ناحیه اول نمودار با کاهش زاویه انتها، به سبب کاهش ارتفاع ناحیه پخ خورده و در نتیجه تخریب سریع این ناحیه از نمونه است.
- نمونه با شکل انتهایی مختلف از خود رفتارهای مختلفی در تخریب نشان می‌دهد. با توجه به آزمایشات انجام شده، نمونه با انتهایی نیم گرد از تخریب کمتر برخوردار بوده و بعد از آن نمونه با زاویه پخ دو طرفه می‌باشد.

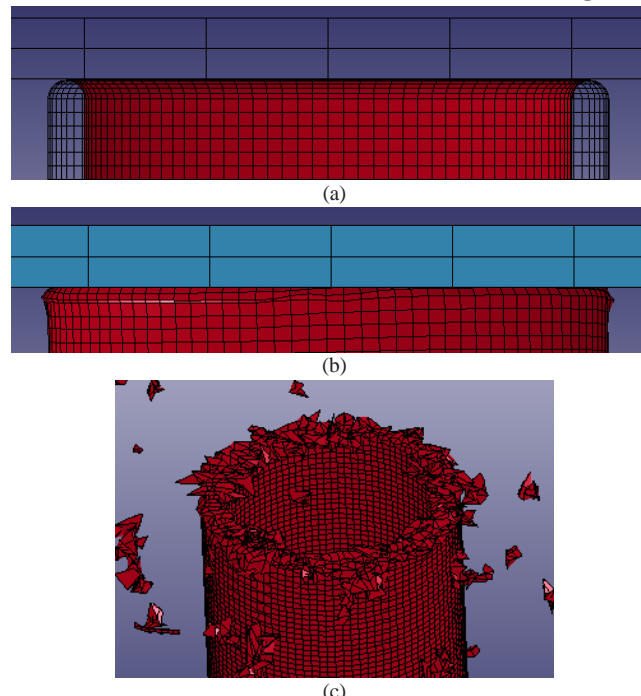


Fig. 35. Sample with geometric shape of semicircular end, (a) view of end type of the sample, (b) failure moment in sample, (c) sample after impacting

شکل 35 نمونه با شکل هندسی انتهایی نیم گرد- (a) نمایی از نوع انتهایی نمونه- (b) لحظه شکست در نمونه- (c) نمونه بعد از اعمال ضربه

- [20] Hatami, H., and M. Damghani Nouri. "Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities " *Latin American Journal of Solids and Structures* Vol. 12, No. 10 ,pp:1950-1971,2015.
- [21] McGregor, C. J., Vaziri, R., Poursartip, A., & Xiao, X., "Simulation of progressive damage development in braided composite tubes under axial compression", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Vol. 38, No. 11: 2247-2259,2007.
- [22] Xiao, X., McGregor, C., Vaziri, R., & Poursartip, A., "Progress in braided composite tube crush simulation", *International Journal of Impact Engineering* 36(5): 711-719,2009.
- [23] Mehrabani Yeganeh, E., Liaghat, G.H., Pol M.H., "Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries", *InPersian, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015.(in Persianفارسی)
- [24] Sevkati, E., Liaw, B., Delale, F., & Raju, B. B., "Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(8): 1090-1110,2009.
- [25] Kaw, Autar K. *Mechanics of composite materials*. CRC press, 2005.
- [26] Flanagan, D. P. and L. M. Taylor., "An accurate numerical algorithm for stress integration with finite rotations", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 62(3): 305-320,1987.