



بررسی تجربی پارامترهای تاثیر گذار بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری

امید نجف‌زاده اصل¹، محمدحسین پل^{2*}، نبی‌اله رضایی گلشن¹

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تفرش، صندوق پستی 3951879611، m_h_pol@tafreshu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 دی 1396

پذیرش: 26 بهمن 1396

ارائه در سایت: 24 اسفند 1396

کلید واژگان:

لوله‌های کامپوزیتی

بارگذاری دینامیکی محوری

انرژی جذب شده ویژه

سقوط وزنه

چکیده

لوله‌های کامپوزیتی در طول استقرار در محل یا کارکرد، ممکن است تحت بارهای ضربه‌ای قرار گیرند. با تعیین خواص ضربه‌ای لوله‌های کامپوزیتی و بهره‌گیری از آن‌ها در فرایند طراحی، صحت رفتار این سازه‌ها در شرایط بارگذاری ضربه‌ای تضمین می‌شود. در این پژوهش، رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری دینامیکی محوری به صورت تجربی، بررسی شده است. همچنین تاثیر پارامترهایی نظیر چگالی الیاف، زاویه چیدمان الیاف، قطر داخلی لوله و انرژی ضربه بر میزان تخریب لوله‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E با دو چگالی متفاوت 200 gr/m^2 و 400 gr/m^2 استفاده شد. نمونه‌ها توسط یک فیکسچر، بر روی دستگاه سقوط وزنه دانشگاه تفرش قرار داده شدند و ضربه زن از ارتفاع 2 متری بر روی آن‌ها رها شد. نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر آزمایش، استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین پارامتری به نام جذب انرژی ویژه، جهت مقایسه بهتر کارایی نمونه‌ها به عنوان انرژی، برای نمونه‌های تمام آزمایش‌ها محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش چگالی الیاف، تعداد لایه‌ها و قطر داخلی لوله، سبب افزایش انرژی جذب‌شده ویژه می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش انرژی ضربه دینامیکی محوری، خواص مکانیکی نمونه تغییر پیدا کرده و نمونه مستحکم‌تر خواهد شد.

Experimental study on the parameters affecting behavior of glass/epoxy composite tubes under axial impact loading

Omid Najafzade Asl, Mohammad Hosein Pol*, Nabiollah Rezaei Golshan

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

* P.O.B. 3951879611, Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 05 January 2017

Accepted 15 February 2018

Available Online 15 March 2018

Keywords:

Composite tubes

Dynamic loading

Specific energy absorption

Drop weight

ABSTRACT

Composite tubes may be subjected to impact loads during placement or operation. By determining the impact properties of composite tubes and using them in the design process, the accuracy of the behavior of these structures in the loading condition is guaranteed. In this study, the behavior of glass/epoxy composite tubes under dynamic axial loading was experimentally investigated. Also, the effects of parameters such as fiber density, fiber alignment angle, internal diameter of the tube and impact energy on the amount of pipe damage were also studied. To prepare composite specimens, E-type glass fiber was used with two different densities of 200 gr/m^2 and 400 gr/m^2 . The specimens were placed on a drop weight machine of Tafresh University by a fixture, and the Impactor was released from the height of 2 meters. The force-displacement diagrams for each test were extracted and compared with each other. Also, a parameter called specific energy absorption was calculated for all samples in order to compare the efficiency of the samples as energy absorber. The results of this study showed that increasing the fiber density, number of layers and diameter of the tube increases the specific energy absorption. It was also observed that with the increase of the axial dynamic impact energy, the mechanical properties of the specimen will be changed and the specimen will be firmly established.

1- مقدمه

خرابی‌هایی می‌توانند در گستره وسیعی از سرعت‌های ضربه‌زننده رخ دهند. از جمله این موارد می‌توان به ضربه در سرعت پایین (مانند سقوط یک ابزار بر روی جسم) که بسیار متداول است، اشاره کرد [1]. دانش فعلی در برخی از زمینه‌های مرتبط به مواد مرکب، به سطح مناسبی از بلوغ رسیده است. به‌عنوان مثال، در زمینه چگونگی مدل کردن

امروزه لوله‌های کامپوزیتی، به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. یکی از مسائل مرتبط با لوله‌های کامپوزیتی، تاثیر ضربه‌های اجسام خارجی بر روی آن‌هاست. زیرا ممکن است خرابی‌های قابل توجهی در داخل آن‌ها رخ دهد و این تخریب‌ها با چشم غیرمسلح قابل‌رویت نباشند. چنین

Please cite this article using:

O. Najafzade Asl, M. H. Pol, N. Rezaei Golshan, Investigation of inlet guide vanes and return channel angle effects on two-stage compressor performance with one-dimensional simulation, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 04, pp. 79-89, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پاسخ لوله‌های سوراخ‌دار تحت بار فشاری محوری، توسط طاهری و همکاران [12] بررسی شد. هدف از این تحقیق، بررسی اثر بار محوری بحرانی بر روی لوله‌های شیشه/اپوکسی سوراخ‌دار با استفاده از روش‌های عددی و تجربی بود. با توجه به نتایج، لوله‌های سالم و سوراخ‌دار، حالت شکست و بی‌ثباتی مشابهی تحت بار محوری از خود نشان دادند. وانگ و همکاران [13]، 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.

رفتار له‌شدگی محوری و پاسخ جذب انرژی لوله‌های مخروطی-پر شده از فوم تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری، با استفاده از مدل المان محدود غیرخطی توسط زد. احمد و ثمیر اتنام [14] بررسی شد. آن‌ها دریافتند که عملکرد له‌شدگی و جذب انرژی لوله‌های مخروطی، با پر کردن فوم به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

صادقی و پل [15]، در پژوهشی به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی برش پانچ پرداختند و نتیجه گرفتند که تغییر هندسه ضربه‌زن باعث تغییر مکانیزم شکست، می‌شود. آنان در مطالعه‌ای دیگر [16]، به بررسی ویژگی‌های برش پانچ صفحات کامپوزیتی ساخته شده از شیشه/اپوکسی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که استفاده از نانو لوله‌های کربنی، استحکام نمونه‌ها را کاهش داد. مهربانی. و همکاران [17]، رفتار لمینت ساخته شده از الیاف شیشه‌ای بافته شده تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با ضربه‌زن‌های مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین منطقه آسیب در حد سرعت بالستیک برای هر پرتابه است و پرتابه در این منطقه دچار انحراف شدید می‌گردد.

در پژوهش حاضر نیز، رفتار لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری دینامیکی محوری به‌صورت تجربی، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر پارامترهایی نظیر چگالی الیاف، زاویه چیدمان الیاف، قطر داخلی لوله و انرژی ضربه بر میزان تخریب لوله‌ها نیز بررسی شد.

2- نمونه‌ها و آزمایش تجربی

2-1- ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش، ماتریس از نوع رزین اپوکسی دی‌گلیسیدیل اتریسیفنول نوع آ² با نام تجاری اپیون 828³ انتخاب شد. از خواص این نوع رزین می‌توان به استحکام بالای مکانیکی و سازگاری با الیاف اشاره کرد. سفت‌کننده‌های زیادی برای این نوع رزین وجود دارند که هر کدام بنا به شرایط کارکرد و خواص مطلوب انتخاب می‌شوند. در این بررسی، از سفت‌کننده سیکلو آلیفاتیک آمین اصلاح‌شده با نام تجاری اف 205⁴ استفاده شده است (شکل 1). نسبت مخلوط رزین به سفت‌کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده، 2 به 1 است. برای ساخت ماتریس، با توجه به دستور ساخت شرکت سازنده، رزین اپوکسی و هاردنر، به نسبت 2 به 1 در یک ظرف پلاستیکی ریخته شدند. سپس جهت مخلوط شدن دو ماده فوق به صورت یکنواخت، مایع به مدت 5 دقیقه هم زده شد.

برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E که دارای بافت دوبعدی با خواص طولی و عرضی یکسان هستند استفاده شد. جهت بررسی

فرورفتگی موضعی توسط فرورونده‌های هموار در یک صفحه کامپوزیتی، تقریباً توافق کلی بین محققان به‌دست آمده است. اما در دیگر زمینه‌ها، روش‌های رایج موجود، به‌طور کامل، متقاعدکننده نمی‌باشند. این مسئله به‌ویژه در زمینه پیش‌بینی تخریب و خواص باقیمانده کامپوزیت‌های تخریب شده توسط ضربه، حائز اهمیت می‌باشد [2]. یکی از مسائل مهم در زمینه کاربرد کامپوزیت‌ها، تاثیر ضربه‌های خارجی بر روی این‌گونه سازه‌هاست. چنین ضرباتی معمولاً در حین کارکرد قطعات رخ داده و می‌توانند باعث خرابی‌هایی در داخل قطعه شوند. این نوع خرابی‌ها از آن نظر حائز اهمیت هستند که با آن‌که اغلب با چشم غیرمسلح قابل رویت نمی‌باشند، اما موجب کاهش شدیدی در استحکام و پایداری سازه‌ها می‌شوند [3]. این مساله منجر به انجام فعالیت‌ها و تحقیقات عمیقی در زمینه مقاوت مواد کامپوزیتی در برابر بارهای ضربه‌ای خارجی شده است.

لوتیس ان.اس. چپو و همکاران [4]، یک مطالعه تجربی بر روی رفتار کامپوزیت کربن/اپوکسی تحت بار استاتیکی و دینامیکی با نرخ کرنش تا 100 s^{-1} انجام دادند. نتایج نشان داد که رفتار مواد آزمایش شده تا نرخ کرنش 100 s^{-1} ، مستقل از نرخ کرنش است. معینی فرد و همکاران [5]، 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 تقویت‌شده، در برابر بارگذاری جانبی، مستحکم‌تر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون تقویت‌کننده است. امین دینیز و همکاران [6]، اثر شرایط محیطی بر عمر خستگی لوله‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت بارگذاری ضربه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان غوطه‌وری در آب، به خاطر خوردگی ماتریس در اثر نمک آب دریا، جدایش ماتریس و الیاف بیش‌تر می‌شود.

ای. مهدی و همکاران [7]، 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 [15/-75] و [15/75] از لحاظ جذب انرژی و توان تحمل بار، بهینه‌تر هستند. ممدوح کارا و همکاران [8]، تاثیر تعمیر آسیب ناشی از ضربه وارده بر لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف بوسيله وصله‌های کامپوزیتی را بررسی کردند. آنان به این نتیجه رسیدند که برای لوله‌های کامپوزیتی آسیب‌دیده، تعمیر با وصله‌های کامپوزیتی با تعداد لایه‌های کافی، مقاومت موردنیاز را ایجاد می‌کند. ای. مهدی و تی.ای. سبای [9]، به‌طور 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.

اف. ابدوی و همکاران [10] به مطالعه تاثیر هندسه موج‌دار بر رفتار له‌شدگی، جذب انرژی، مکانیزم شکست و مودهای شکست یک لوله کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی پرداختند. نتایج نشان داد که لوله‌های موج‌دار در جهت شعاعی، به مراتب جذب انرژی بهتری در مقایسه با لوله‌های استوانه‌ای دایره‌ای دارند. جانگ سوک کیم و همکاران [11]، مودهای شکست و توان جذب انرژی انواع لوله‌های کامپوزیتی که از الیاف کربن، کولار و ترکیب کربن-کولار با رزین اپوکسی ساخته شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنان نشان داد لوله‌هایی که با حالت کماتش، دچار شکست شدند، ارتباط خوبی بین خواص مکانیکی و جذب انرژی ویژه¹ را نشان نمی‌دهند.

² A diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)

³ Epone 828

⁴ Epikure F-205

¹ SEA



Fig. 4 Mandrel diameter correction with machining

شکل 4 اصلاح قطر مندرل با ماشین‌کاری

ماتریس، الیاف بافته‌شده با زاویه $[0,90]$ و $[\pm 45]$ به دور مندرل پیچیده شدند. در هنگام پیچیدن الیاف، یک جسم به وزن 4 کیلوگرم به عنوان پیش بار، بر روی الیاف قرار داده شد. در هر لایه پیچش الیاف به دور مندرل مقوایی، مقدار مشخصی رزین توسط قلم موی نقاشی به‌طور یکنواخت در تمام نواحی الیاف پخش شد. پس از اتمام پیچش الیاف به دور مندرل، لوله در دستگاه چرخان لوله، قرار داده شد. لوله‌ها به مدت 3 ساعت در دستگاه، چرخانده شدند تا به پخت اولیه برسند و رزین کمی سفت شود (شکل 6). سپس از دستگاه خارج شده و بدون دوران در دمای محیط به مدت 8 روز قرار داده شدند. پس از پخت کامل و آماده شدن نمونه‌های کامپوزیتی، مندرل از لوله‌ها خارج شد.

پس از خشک شدن، یک انتهای تمام نمونه‌ها با زاویه 45 درجه پخ زده شد. این کار به دلیل شروع تخریب پیش‌رونده از انتهای پخ‌خورده و جلوگیری از ایجاد آسیب فاجعه بار در نمونه‌ها، تحت بار ضربه‌ای محوری است (شکل 7).

2-2- ساخت فیکسچر و ضربه زن

در آزمایش ضربه دینامیکی با دستگاه سقوط وزنه، نمونه‌ها باید در انتهای دستگاه توسط فیکسچر، نگه‌داشته شوند تا در حین ضربه، از مکان خود جابجا نشوند. در این پژوهش، فیکسچر به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که نمونه‌ها در فیکسچر، توسط 4 پیچ، مهار شوند و فیکسچر از انتهای دستگاه متصل شود. محققان در پژوهش‌های خود، براساس شرایط بارگذاری، از



Fig. 5 Fiber winding and sample manufacturing

شکل 5 پیچش الیاف و ساخت نمونه



Fig. 6 Tube rotary device

شکل 6 دستگاه چرخان لوله

تاثیر فاکتور چگالی سطحی در آزمایش‌ها، نمونه‌ها با دو نوع الیاف شیشه یکی با چگالی سطحی 200 gr/m^2 و دیگری با چگالی سطحی 400 gr/m^2 ساخته شده‌اند (شکل 2). در صورتی که چگالی الیاف کمتر از مقدارهای پیشنهادی باشد، در روش لایه‌چینی دستی، امکان خروج تارها از حالت عمود بر هم و در نتیجه تغییر خواص مطلوب نهایی وجود دارد.

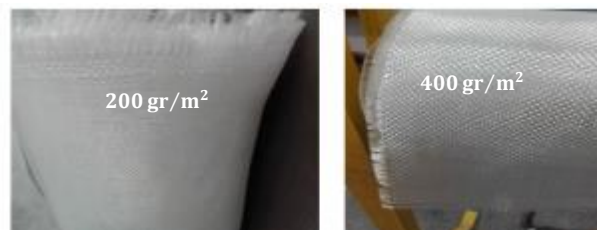
در ساخت لوله‌های کامپوزیتی، الیاف معمولاً به دور یک قالب استوانه‌ای شکل که مندرل نامیده می‌شود، پیچیده می‌شوند. در این پژوهش، نیاز به استفاده از مندرل‌های جداشدنی در ساخت نمونه‌ها بود. از آن‌جا که استفاده از مندرل‌های گچی و تفلونی، پرهزینه و زمان‌بر است، از نوعی لوله از جنس مقوا استفاده شد (شکل 3). سهولت خارج کردن این نوع مندرل از نمونه و سهولت ماشین‌کاری و ساین کردن این لوله‌ها از جمله مزیت‌های استفاده از این نوع مندرل بود. مندرل‌ها با دستگاه تراش، روتراشی شدند تا ابعاد مورد نظر، حاصل گردد (شکل 4). سپس یک لایه چسب نواری شفاف به دور مندرل مقوایی پیچیده شد تا از نفوذ رزین به داخل مقوا و نفوذ آب به رزین، جلوگیری کند. این امر، همچنین باعث سهولت خارج کردن مندرل از داخل نمونه‌ها شد.

به سبب کاهش هزینه‌های پژوهش، ساخت نمونه‌ها به روش دستی انجام شد (شکل 5). هرچند روش ساخت دستی به اندازه روش پیچش الیاف دقیق نیست؛ ولی در این پژوهش، سعی بر آن شد تا در هر مرحله از ساخت، پارامترهای موثر در نتایج پژوهش مانند درصد وزنی رزین و هاردنر، طول الیاف، زاویه الیاف، دمای محیط، قطر مندرل و کسر حجمی الیاف و رزین در نمونه به دقت کنترل شود تا کمترین میزان خطا در نتایج آزمایش‌ها به‌دست آید. پس از مخلوط کردن رزین و هاردنر به میزان مشخص و آماده شدن



Fig.1 epoxy resin and F205 Hardener

شکل 1 رزین اپوکسی و سفت‌کننده اف 205

Fig. 2 400 gr/m^2 and 200 gr/m^2 woven fiber

شکل 2 الیاف بافته شده 200 و 400 گرم بر متر مربع



Fig. 3 paper mandrel for creating the composite tubes

شکل 3 مندرل کاغذی برای ساخت لوله‌های کامپوزیتی

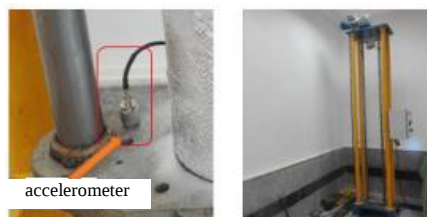


Fig. 9 Drop weight Device and accelerometer connected to it

شکل 9 دستگاه سقوط وزنه و شتاب‌سنج متصل شده به آن

دینامیکی محوری، نمونه‌ها مطابق جدول 1 ساخته شدند. مشخصات نمونه‌ها و تنظیمات مربوط به هر آزمایش، در این جدول گنجانده شده است. برای هر آزمایش تعداد 2 نمونه ساخته شد تا جهت اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش، دو بار انجام گیرد.

3- نتایج

3-1- نمودار نیرو - جابجایی

در طول فرآیند آزمون ضربه به صورت دینامیکی و شبه‌استاتیکی، اطلاعات آزمون توسط حسگر شتاب‌سنج به دستگاه داده خوان³ انتقال پیدا کرده و در نهایت، خروجی آزمایش، معمولاً نمودارهای نیرو - جابجایی و یا سرعت-جابجایی هستند.

نمودارهای نیرو- جابجایی حاصل از آزمون سقوط وزنه، به شکل یک موج سینوسی تند هستند. این نمودارها از سه ناحیه تشکیل می‌شوند. ناحیه اول، مربوط به شروع فرآیند له‌شدگی و قبل از آغاز تخریب نمونه است. در این ناحیه، نیرو ابتدا با شیب تند افزایش پیدا کرده و پس از رسیدن به نقطه اوج نیرو⁴ (حداکثر نیرو) با شیب تند کاهش می‌یابد. در ناحیه دوم، نمودار حول یک منحنی، نوسان سینوسی دارد. در صورتی که نمونه در جهت طولی دارای خواص یکسان باشد، این ناحیه معمولاً با یک الگوی تکراری ادامه پیدا می‌کند تا به ناحیه سوم برسد. معمولاً بیشترین جذب انرژی در این ناحیه صورت می‌گیرد. در ناحیه سوم، به علت جذب انرژی ضربه اول توسط نمونه در طول تخریب، شتاب و نیروی ضربه‌زننده، تا مقدار 0 کاهش پیدا کرده و نمودار با شیب تندی سقوط می‌کند. در این ناحیه به دلیل این که بخشی از روند ضربه، به صورت له‌شدگی الاستیک است، نیروی بارگذاری، صفر شده و باربرداری آغاز می‌شود [8]. در این پژوهش، نمونه‌ها با هدف بررسی میزان جذب انرژی و مقدار تخریب در طول آزمایش، تحت آزمون ضربه سقوط وزنه قرار گرفتند.

در طول انجام آزمون ضربه، داده‌های شتاب ضربه زن، در بازه زمانی مشخص، جمع‌آوری شد. سپس در نرم‌افزار اکسل، نمودار شتاب برحسب زمان برای داده‌ها رسم شده و پس از آن به استخراج نمودار نیرو برحسب جابجایی و میزان جذب انرژی پرداخته شد.



Fig. 10 Data logger and high speed camera

شکل 10 ثبت‌کننده داده و دوربین سرعت بالا



Fig. 7 chamfering the samples with a grinding machine

شکل 7 پخ زدن انتهای نمونه‌ها با ماشین تراش

نمونه‌های مختلف ضربه‌زن استفاده کرده‌اند. مهم‌ترین ویژگی ضربه‌زن در آزمایش‌های سقوط وزنه این پژوهش، صاف بودن انتهای ضربه‌زن، موازی بودن با سطح نمونه و صلیبیت ضربه‌زن بود. از آن جایی که قطر نمونه‌ها متفاوت بود، یک ضربه‌زن استوانه‌ای از جنس فولاد سخت‌کاری شده با قطر 90 میلی‌متر و ارتفاع 50 میلی‌متر ساخته شد. یک انتهای ضربه زن، سوراخ و رزوه شد تا توسط پیچ، به دستگاه و وزنه‌ها متصل شود (شکل 8).

3-2- تنظیمات دستگاه

برای انجام آزمایش‌های سقوط وزنه، از دستگاه سقوط وزنه دانشگاه تفرش با ظرفیت حداکثر انرژی 3000 ژول و حداکثر ارتفاع 2.2 متر استفاده شد. عمل داده‌گیری در طول آزمایش، توسط یک شتاب‌سنج پیزوالکتریک با ظرفیت اندازه‌گیری 2000g و یا 20000m/s استفاده شد. شتاب‌سنج بر روی قسمتی از ضربه زن دستگاه، نصب شد (شکل 9).

داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگر شتاب‌سنج، در طول آزمایش، به یک ثبت‌کننده داده¹ انتقال داده شد. مطابق "شکل 10"، این ثبت‌کننده داده، 16 کاناله بوده و حداکثر سرعت داده برداری آن 1 سمپل در هر میکروثانیه است. ولی در این پژوهش از سرعت داده برداری 1 سمپل در هر 40 میکروثانیه استفاده شد. فیلتراسیون داده این دستگاه بین 0 تا 1000 هرتز بود و فرکانس‌های بالای 1000 هرتز توسط ثبت‌کننده داده حذف شدند تا نوسانات شدید ناشی از نویزهای به‌وجود آمده، در داده‌های شتاب استخراج شده فیلتر شوند. داده‌های ذخیره شده در دستگاه ثبت‌کننده داده، توسط درگاه R422 به کامپیوتر انتقال داده شده و در نرم‌افزار مربوط به دستگاه، نمایش داده شد. سپس نمودار شتاب برحسب زمان از آن استخراج شد. در طول آزمون‌ها، از یک دوربین فیلم‌برداری سرعت بالا مدل کاسیو² با بزرگنمایی 16.1 مگاپیکسل و با سرعت حداکثر 1000 فریم بر ثانیه استفاده شد (شکل 10). البته جهت افزایش کیفیت تصاویر ثبت شده از آزمون ضربه صورت گرفته، سرعت دوربین بر روی 460 فریم بر ثانیه تنظیم شد.

4-2- آزمایش دینامیکی محوری

برای بررسی پارامترهای موثر بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری



Fig. 8 fixture & Impactor

شکل 8 فیکسچر و ضربه زن

³ Data logger

⁴ Force peak

¹ Data Logger

² CASIO

جدول 1 مشخصات فیزیکی نمونه‌های ساخته شده و تنظیمات آزمون‌های ضربه

Table 1 Physical properties of the samples and impact tests settings

شماره آزمایش	چگالی الیاف (gr/m ²)	زاویه چیدمان (درجه)	قطر داخلی (میلی‌متر)	ارتفاع نمونه (میلی‌متر)	تعداد لایه	زاویه انتها (درجه)	ارتفاع ضربه (متر)	وزن ضربه زن (کیلوگرم)	سرعت برخورد (m/s)	انرژی ضربه (ژول)	تعداد نمونه
1	200	[0,90]	40	100	10	45	2	50	6.3	981	2
2	400	[0,90]	40	100	10	45	2	50	6.3	981	2
3	200	[+45,-45]	40	100	10	45	2	50	6.3	981	2
4	400	[+45,-45]	40	100	10	45	2	50	6.3	981	2
5	200	[0,90]	30	100	10	45	2	50	6.3	981	2
6	200	[0,90]	40	100	10	45	2	75	6.3	1471	2
7	400	[0,90]	40	100	10	45	2	75	6.3	1471	2

ثابت نگه‌داشته شد. در این آزمایش، از نمونه‌های ساخته شده با الیاف 400 gr/m² استفاده شد. نمودار نیرو-جابجایی استخراج شده از این آزمایش در "شکل 13" قابل مشاهده است.

اوج نیرو برای آزمایش شماره 2 تقریباً 2 برابر آزمایش 1 است. چرا که نمونه‌های آزمایش شماره 2 از الیافی با چگالی سطحی بالاتر و استحکام نهایی بیش‌تر نسبت به نمونه‌های آزمون 1 ساخته شده بودند و برای شروع تخریب، نیازمند انرژی و نیروی بالاتری نسبت به آزمایش شماره 1 می‌باشند. این امر باعث شده است تا تخریب نمونه 2 در سطح نیروی بالاتری انجام شده و به دلیل اینکه انرژی ضربه در هر دو آزمایش 1 و 2، یکسان بود و کل انرژی برای هر دو آزمایش در طول تخریب نمونه، جذب شد، بنابراین طول تخریب (ناحیه 2) برای آزمایش 2 کوتاه‌تر شد و نمونه توانست کل انرژی ضربه را در 33 میلی‌متر جابجایی، جذب کند.

در آزمایش شماره 3، از نمونه‌های ساخته شده با الیاف 200 gr/m² استفاده شد، ولی چیدمان الیاف به جای [0.90] به صورت [±45] در نظر گرفته شد تا تاثیر چیدمان الیاف بر میزان جذب انرژی لوله‌های کامپوزیتی دارای مشخصات فیزیکی یکسان، مشخص شود. در "شکل 14"، مقایسه نمودار آزمایش شماره 3 با آزمایش شماره 1 ملاحظه می‌شود.

در "شکل 14" ملاحظه می‌شود که با تغییر زاویه الیاف، نمودار، کشیدگی بیشتری نسبت به نمودار معیار دارد. ولی ارتفاع نمودار کم‌تر شده است. چرا که در این آزمایش، به دلیل این‌که زاویه الیاف نمونه‌ها با راستای نیروی وارده، 45 درجه بود، استحکام الیاف کاهش پیدا کرده و نیروی بیشتری به ماتریس وارد شد و این امر باعث ایجاد ترک ماتریس و کاهش مقاومت اولیه نمونه و کاهش سطح نیروی متوسط در ناحیه 2 شد.

در این نمونه‌ها، چون شکست اولیه در سطح پایین‌تری از نیرو اتفاق افتاده است و نوسان نیرو در ناحیه 2 نمودار نیز حول نیروی کمتری نسبت به نمودار معیار می‌باشد (حدود 16500 نیوتن)، جذب انرژی کامل ضربه،

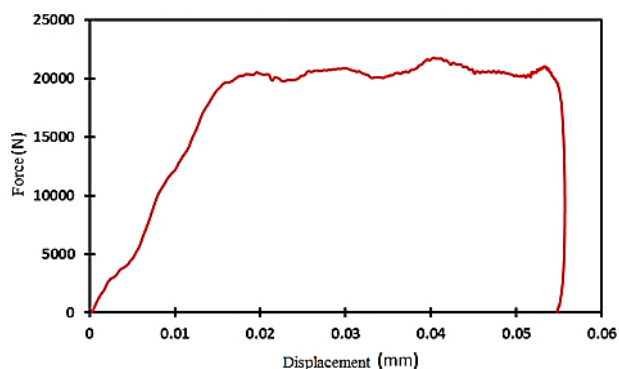


Fig. 12 Force-Displacement diagram of test num.1

شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 1

آزمون سقوط وزنه برای هر آزمایش، بر روی 2 نمونه مشابه انجام شد و پس از بررسی نتایج، به دلیل اختلاف کم داده‌ها (از 3 تا 10 درصد)، داده‌های میانگین 2 آزمایش در نظر گرفته شد. در "شکل 11"، نمودار شتاب-زمان برای 2 نمونه آزمایش 1، مشاهده می‌شود.

در این پژوهش، آزمایش شماره 1 به عنوان آزمایش معیار قرار گرفت و نتایج سایر آزمایش‌ها جهت بررسی میزان تاثیر هر پارامتر، با آزمایش 1 مقایسه شد. نمودار نیرو-جابجایی آزمایش شماره 1 برای داده‌های میانگین 2 نمونه، در "شکل 12" مشاهده می‌شود.

مطابق "شکل 12"، برای آزمایش شماره 1، پس از این‌که ضربه‌زن به نمونه برخورد کرد، نیرو افزایش پیدا کرد. این افزایش نیرو با شیب تند، به دلیل مقاومت انتهای بالایی نمونه در برابر نیروی وارده و جلوگیری از شروع تخریب بود. ضربه‌زن تا مقدار پیش‌روی 16 میلی‌متر با مقاومت نمونه مواجه شده و تا این میزان جابجایی، نیرو در نمودار افزایش یافت. پس از این مقدار، نمونه دچار شکست شده و تخریب شروع شد و تا 55 میلی‌متر، این تخریب ادامه یافت. در طول این تخریب، تمام انرژی ضربه‌زن صرف شکستن ماتریس و الیاف و ایجاد مود بازشدگی در نمونه شد و کل انرژی ضربه وارده از طرف ضربه‌زن به نمونه، جذب شد و ضربه‌زن متوقف شد. در ناحیه دوم نمودار، در جابجایی 40 میلی‌متر، در نمودار یک بالاروندگی ملاحظه می‌شود که احتمالاً به خاطر تجمع قسمت‌های تخریب‌شده نمونه در داخل و در ناحیه تخریب است که باعث افزایش نیرو برای ادامه پیش‌روی شکست می‌شود. البته به دلیل ساخت دستی نمونه‌ها، مسلماً خواص در راستای محوری برای نمونه‌ها، یکسان نیست و احتمال وجود منطقه‌ای با چگالی الیاف بالاتر نسبت به سایر نقاط، در داخل نمونه‌ها وجود دارد که می‌توان افزایش ناگهانی نمودار در طول تخریب را به وجود این مناطق نیز، نسبت داد.

در آزمایش شماره 2، تمام پارامترهای آزمایش معیار به جز چگالی الیاف،

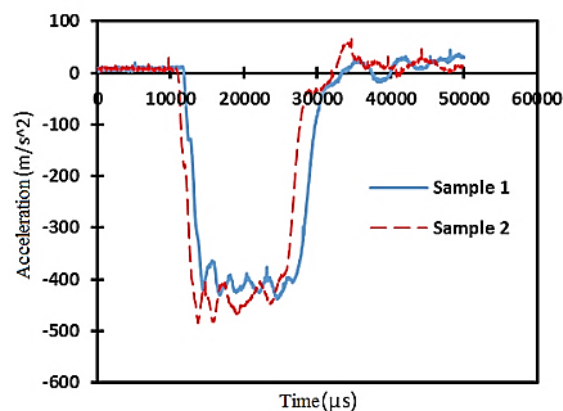


Fig. 11 Acceleration-Time diagrams of 2 samples of test num.1

شکل 11 نمودارهای شتاب زمان برای دو نمونه آزمایش 1

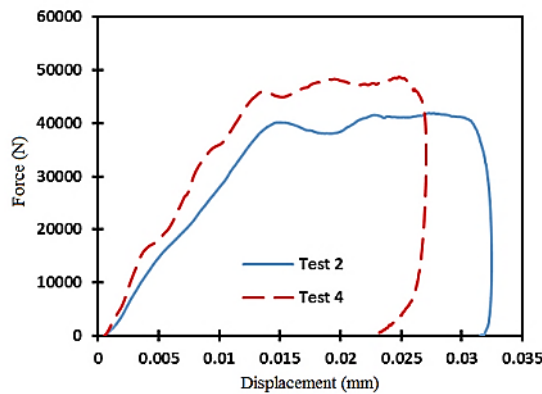


Fig. 15 Comparison of diagram test num. 2&4

شکل 15 مقایسه نمودارهای آزمایش 2 و 4

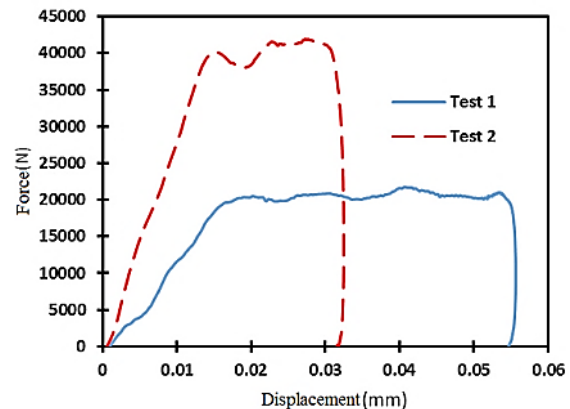


Fig. 13 Comparison of diagram test num. 1&2.

شکل 13 مقایسه نمودار آزمایش 1 و 2

زاویه از حالت $[0.90]$ به $[\pm 45]$ منجر به افزایش نیروی مورد نیاز برای شروع تخریب نمونه و کاهش میزان تخریب نمونه می‌گردد. در نتیجه در لوله‌های 400 gr/m^2 کارایی جذب انرژی لوله‌هایی که با چیدمان $[\pm 45]$ ساخته شده‌اند بهتر از نمونه‌هایی با چیدمان $[0.90]$ است. همچنین در شکل 16، نمودار دو آزمایش 3 و 4 جهت مقایسه تاثیر چگالی الیاف در چیدمان $[\pm 45]$ در میزان جذب انرژی ملاحظه می‌شود. در "شکل 16" به وضوح ملاحظه می‌شود که افزایش چگالی الیاف در نمونه‌هایی که چیدمان $[\pm 45]$ دارند به شدت بر روی کارایی جذب انرژی نمونه لوله کامپوزیتی تاثیرگذار است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که اولاً چون در نمونه‌های 400 gr/m^2 کسر حجمی الیاف نسبت به ماتریس در مقایسه با نمونه‌های 200 gr/m^2 بالاتر است، این امر باعث افزایش مقاومت لوله در برابر نیروی محوری می‌شود. ثانیاً به دلیل این‌که کسر حجمی ماتریس در نمونه‌های 200 gr/m^2 نسبت به نمونه‌های 400 gr/m^2 بیشتر است، نیروی وارده به نمونه‌ها، باعث شکسته و خرد شدن ماتریس شده که این امر باعث می‌شود تا الیاف هم تحمل نیروی وارده را نداشته باشند و نمونه با نیروی کمتر، شروع به تخریب شدن کند و برای این‌که تمام انرژی ضربه جذب شود نیازمند تخریب نمونه در طول بیشتری خواهد بود.

در آزمایش شماره 5، به بررسی تاثیر تغییر قطر داخلی لوله با تعداد لایه‌های یکسان بر میزان جذب انرژی نمونه‌ها پرداخته شد. در این آزمایش، قطر داخلی نمونه‌ها 30 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

مطابق "شکل 17"، برای آزمایش 5 نیز، هرچند نمودار در مرحله 1 تقریباً نیرویی برابر با نیروی نمودار آزمایش 1 را نشان می‌دهد، اما به وضوح مشخص است که به دلیل کاهش قطر نمونه نسبت به نمونه آزمایش 1، نمونه در این مرحله دچار شکست‌ها و ترک‌های داخلی شده که این امر موجب به وجود آمدن نوسان در ناحیه 1 نمودار نیرو-جابجایی آزمایش 5 شده است. با بررسی نمودارها، دیده می‌شود که طول نمودار برای آزمایش 1، در مرحله 2، در سطح نیروی بالاتر ولی کوتاه‌تر نسبت به نمودار آزمایش 5 هستند که نشان می‌دهد نمونه‌های آزمایش 1 به دلیل داشتن قطر داخلی بالاتر و در نتیجه، وزن بالاتر نسبت به نمونه‌های آزمایش 5، کارایی جذب انرژی بهتری دارند و در انرژی ضربه برابر، نمونه‌ها با قطر بزرگ‌تر، تخریب کم‌تری دارند.

در آزمایش‌های شماره 6 و 7، وزن ضربه‌زن از 50 کیلوگرم به 75 کیلوگرم تغییر داده شد تا تاثیر افزایش انرژی ضربه بر رفتار نمونه تحت ضربه دینامیکی محوری، بررسی شود. نمودارهای نیرو-جابجایی برای دو آزمایش 6 و 7 در "شکل 18 و 19" آورده شده است.

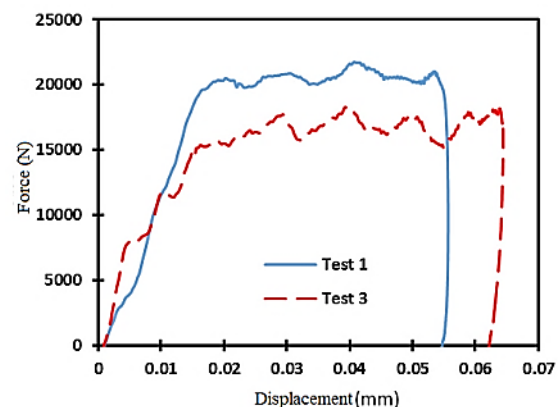


Fig. 14 Comparison of diagram test num. 1&3

شکل 14 مقایسه نمودار آزمایش 1 و 3

نیازمند تخریب بیشتری از طول نمونه است. این امر در نمودار نیرو-جابجایی این آزمایش نیز قابل ملاحظه است. همان‌طور که دیده می‌شود، ناحیه 2 نمودار، تا 63 میلی‌متر ادامه پیدا کرده است که به مقدار 15 درصد، بیش‌تر از میزان جابجایی آزمایش شماره 1 است. این امر نشان‌دهنده کاهش کارایی نمونه‌های 200 gr/m^2 با چیدمان الیاف $[\pm 45]$ برای جذب انرژی در مقابل نمونه‌های $[0.90]$ با چگالی الیاف مشابه است. چرا که میزان انرژی جذب شده در هر دو آزمون تقریباً یکسان است. ولی نمونه‌های آزمون 3 به تخریب بیش‌تری نسبت به نمونه‌های آزمون 1 برای جذب این میزان انرژی دارند. در نمودار نیرو - جابجایی آزمایش 3، یک نوسان در ناحیه اول نمودار، دیده می‌شود و پس از آن نمودار، دوباره شروع به افزایش می‌کند. علت پدید آمدن این نواحی به دلیل به وجود آمدن ترک‌های داخلی در راستای الیاف (راستای 45 درجه) در انتهای بالایی نمونه است. در آزمایش شماره 4، جهت بررسی تاثیر زاویه الیاف در نمونه‌های با الیاف 400 gr/m^2 ، دو نمونه با چیدمان $[\pm 45]$ تحت آزمون ضربه با پارامترهای مشابه آزمایش 2، قرار گرفتند. در "شکل 15"، مقایسه نمودار نیرو-جابجایی میانگین دو نمونه با نمودار نیرو - جابجایی آزمایش شماره 2 ملاحظه می‌شود.

در آزمایش شماره 4، بر خلاف آزمایش 3، شیب نمودار در مرحله 1، بیش‌تر از نمودار آزمایش شماره 2 است. همچنین سطح نمودار نیز در مرحله 2 بالاتر است. این مطلب، نشان می‌دهد که با افزایش چگالی الیاف از 200 gr/m^2 به 400 gr/m^2 ، تاثیر تغییر زاویه الیاف عوض می‌شود. بدین صورت که با افزایش چگالی الیاف به کار برده شده در ساخت نمونه، تغییر

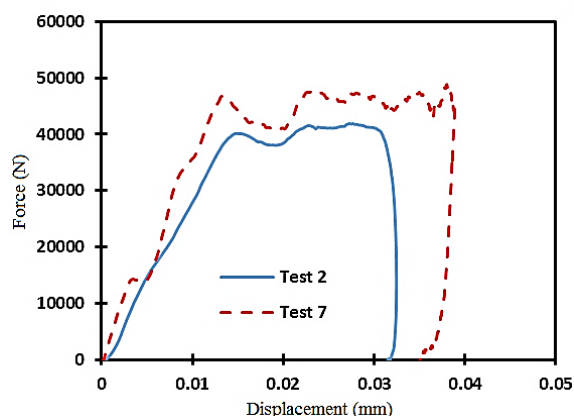


Fig. 19 Comparison of diagram test num. 2&7

شکل 19 مقایسه نمودار آزمایش‌های 2 و 7

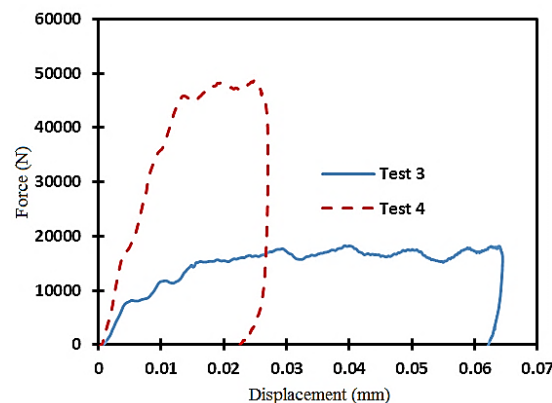


Fig. 16 Comparison of diagram test num. 4&3

شکل 16 مقایسه نمودار آزمایش‌های 3 و 4

جابجایی برای آزمایش 6، حدود 15 درصد بیش‌تر از نمودار آزمایش 1 است. همچنین در "شکل 18"، نمودار آزمایش 6 در ناحیه 2، دارای نوسان بیش‌تر و در برخی نقاط دارای افت معنی‌داری نسبت به نمودار آزمایش 1 می‌باشد که این امر احتمالاً به دلیل وقوع ترک‌های داخلی و شکست الیاف پیش از تخریب در اثر وارد شدن نیروی زیاد است. در آزمایش 7، افزایش انرژی ضربه، بر روی نمونه‌های ساخته شده با الیاف 400 gr/m^2 اعمال شد و نتیجه نمودار نیرو-جابجایی در "شکل 19" با آزمایش 2 مقایسه شد. با توجه به "شکل 19"، با افزایش انرژی ضربه، در نمونه الیاف 400 gr/m^2 نیز همانند نمونه ساخته شده با الیاف 200 gr/m^2 ، شیب نمودار نیرو-جابجایی در ناحیه اول کمی تندتر از نمودار معیار است و در ناحیه دوم نیز به دلیل افزایش نیروی وارده به نمونه، دارای نوساناتی شبیه نوسان‌های آزمایش 6 می‌باشد که می‌تواند به دلیل ایجاد ترک داخلی و شکست الیاف قبل از خردشدگی در طی اعمال ضربه باشد. در آزمایش 7 نیز، نمونه به جهت جذب کل انرژی ایجاد شده، نیازمند تخریب در طول بیش‌تری نسبت به نمونه آزمایش 2 بود.

همان‌طور که در نمودارهای نیرو-جابجایی برای آزمایش‌های 6 و 7 مشاهده شد، با افزایش مقدار انرژی ضربه، مقدار حداکثر نیرو در ناحیه اول و همچنین سطح نیروی متوسط له‌شدگی برای نمونه‌های این دو آزمایش نسبت به آزمایش‌های معیار (آزمایش 1 و 2) افزایش یافته است. این میزان برای آزمایش 6 در حدود 20 تا 25 درصد افزایش، و برای آزمایش 7 در حدود 10 تا 15 درصد افزایش، نسبت به آزمایش‌های معیار است. این مسئله، نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ضربه در آزمایش سقوط وزنه، استحکام نمونه افزایش می‌یابد. این بدین معناست که رفتار نمونه کامپوزیتی در برابر انرژی ضربه‌های مختلف، متفاوت است و نشان می‌دهد که افزایش انرژی ضربه، افزایش خواص مکانیکی نمونه را به دنبال خواهد داشت.

2-3- جذب انرژی

توانایی جذب انرژی در لوله‌های کامپوزیتی در طول فرآیند تست‌های دینامیکی و شبه استاتیکی با چند پارامتر مشخص می‌شوند که عبارتند از: انرژی جذب شده کلی¹: برابر است با مساحت زیر نمودار نیرو - جابجایی که به مساحت سطح مقطع نمونه و چگالی نمونه وابسته است و با E نشان داده می‌شود. این پارامتر با انتگرال‌گیری عددی از نمودار نیرو-جابجایی بدست می‌آید [10].

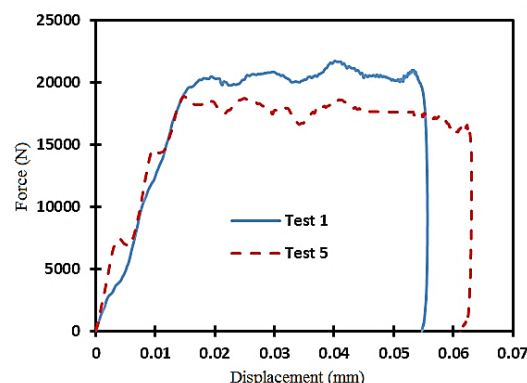


Fig. 17 Comparison of diagram test num. 1&5.

شکل 17 مقایسه نمودار آزمایش‌های 1 و 5

همان‌طور که در "شکل 18" مشاهده می‌شود، نمودار آزمایش 6 برای نمونه‌ای که تحت بار ضربه‌ای با انرژی ضربه حدود 1.5 برابر انرژی ضربه نمونه معیار قرار گرفته است، در ناحیه 1، دارای شیب نسبتاً بیش‌تری نسبت به نمودار آزمایش 1 است.

به این دلیل که با افزایش انرژی ضربه، نیرو به‌طور ناگهانی بر نمونه وارد شده و نمونه در طول جابجایی کوتاه‌تری شروع به تخریب کرده است. بنابراین شروع ناحیه 2 نمودار نیرو-جابجایی (شروع تخریب پیش‌رونده) کمی زودتر از نمودار آزمایش 1 اتفاق افتاد. در ادامه ضربه، به دلیل بالا بودن انرژی ضربه نسبت به آزمایش 1، نمونه برای جذب کامل انرژی، نیازمند تخریب بیش‌تری است و همین امر باعث می‌شود تا طول ناحیه 2 نمودار نیرو

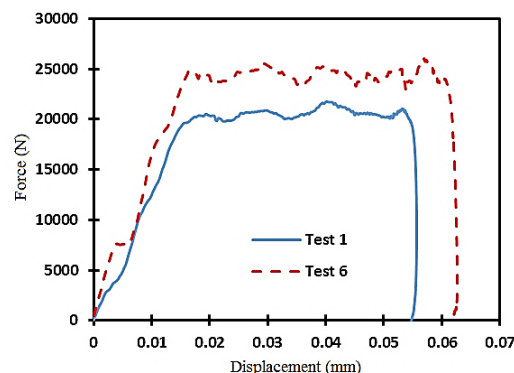


Fig. 18 Comparison of diagram test num. 1&6

شکل 18 مقایسه نمودار آزمایش‌های 1 و 6

¹ Total energy absorbed

از نتایج به‌دست آمده برای آزمایش 5، می‌توان نتیجه گرفت که میزان جذب انرژی نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش قطر داخلی نمونه، افزایش می‌یابد. این مسئله به‌دلیل افزایش مواد به‌کار رفته در ساختار نمونه و افزایش استحکام در برابر نیروهای وارد شده در اثر ضربه محوری است. همان‌طور که در جدول 2 برای آزمایش‌های 6 و 7 ملاحظه می‌شود، افزایش انرژی ضربه، تاثیر بسزایی در افزایش میزان جذب انرژی ویژه نمونه‌ها داشت. همان‌طور که در بخش قبل مطرح شد، افزایش سرعت بارگذاری که در اثر افزایش انرژی ضربه، اتفاق می‌افتد، باعث تغییر خواص مکانیکی نمونه‌ها و افزایش استحکام نمونه‌ها می‌شود. همین امر باعث افزایش سطح نیروی متوسط له‌شدگی در نمونه‌هایی که تحت انرژی بالاتر ضربه بودند می‌شود و با توجه به یکسان بودن وزن و مساحت سطح مقطع نمونه‌های آزمایش 6 و 7 با نمونه‌های آزمایش 1 و 2، میزان انرژی جذب شده ویژه آزمایش 6 و 7 بیش‌تر از آزمایش 1 و 2 خواهد شد.

3-3- بررسی مود شکست

لوله‌های کامپوزیتی، زمانی که در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند، مورفولوژی له‌شدگی و تخریب متفاوتی بسته به نوع تقویت کننده از خود نشان می‌دهند [18]. محققان به طور کلی، تخریب لوله‌های کامپوزیتی را به 3 دسته تقسیم کرده‌اند:

- 1) شکست ترد که در لوله‌های کامپوزیتی بافته شده با الیاف پیش‌آغشته تک جهته، پارچه‌های بافته شده و لوله‌های ساخته شده با الیاف خرد شده رخ می‌دهد. مهم‌ترین مکانیزم جذب انرژی در این نمونه‌ها، له‌شدگی مواد و تکه تکه شدن در باقیمانده ساقه کامپوزیت در منطقه له‌شدگی است [19] (شکل 20 - a).
 - 2) مواد کامپوزیتی در مقابل اعمار نیروی له‌شدگی، خرد نمی‌شوند، بلکه به حالت برگ‌های پیوسته در ساقه لوله در می‌آیند. با پیش‌روی له‌شدگی، برگ‌ها خم شده و در جهت مخالف دیواره لوله، رول می‌شوند. این حالت، بیش‌تر در لوله‌های ساخته شده از الیاف شیشه‌ای پالترود شده دیده می‌شود [20] (شکل 20 - b).
 - 3) برخی لوله‌ها در الگوی خاصی تا می‌شوند. لوله‌ها با الیاف کولار، به این صورت دچار له‌شدگی می‌شوند [19] (شکل 20 - c).
- البته این سه مورفولوژی، وابسته به شرایط باگذاری نیز هستند. یکی از محققان در تحقیقات خود مشاهده کرد که زمانی که وضعیت بارگذاری برای لوله کربن/پیک⁴ از حالت استاتیکی به ضربه دینامیکی تغییر می‌کند، مورفولوژی له‌شدگی از حالت 2 به حالت 1 تبدیل می‌شوند [20].
- برای بررسی مود شکست نمونه‌ها در آزمایش‌های ضربه، شکل نمونه در سه مرحله لحظه شروع ضربه، لحظه اتمام ضربه (که با استفاده از دوربین سرعت بالا گرفته شد) و تصویر نهایی نمونه پس از ضربه، در "شکل‌های 20

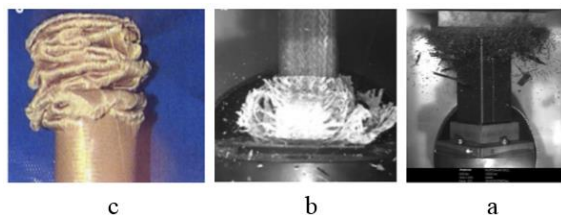


Fig. 20 Different types of composite tubes destruction morphology

شکل 20 انواع مختلف مورفولوژی تخریب لوله‌های کامپوزیتی

⁴ peek

راندمان نیروی له‌شدگی¹: این پارامتر برابر است با نسبت بین نیروی له‌شدگی متوسط و بیشترین بار له‌شدگی اولیه. این پارامتر برای اندازه‌گیری عملکرد جاذب انرژی مفید است و با CFE نشان داده و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (1)$$

در این معادله، P_m برابر میانگین بار له‌شدگی و P_{max} برابر بیشترین اوج بار است [11].

بازده ضربه²: خرد شدن یک لوله منجر به تراکم لوله می‌شود. این امر باعث افزایش مداوم سطح نیروی بارگذاری شده همزمان با افزایش تغییر شکل می‌شود. تغییر شکل نسبی لوله که در آن فشردگی اتفاق می‌افتد به عنوان بازده ضربه مشخص می‌شود و با SE نشان داده می‌شود.

$$SE = \frac{u}{h} \quad (2)$$

در این معادله، u برابر با طول له‌شدگی لوله و h ارتفاع لوله است [11].

انرژی جذب شده ویژه³: برای مقایسه نمونه‌ها با هندسه و یا جنس متفاوت، مقایسه این پارامتر ضروری است. انرژی جذب شده ویژه برابر است با میزان جذب انرژی واحد جرم ماده جاذب و با SEA مشخص می‌شود.

$$SEA = \frac{P_m}{A\rho} \quad (3)$$

در این معادله، P_m برابر میانگین بار له‌شدگی، A برابر مساحت سطح مقطع و ρ چگالی لوله کامپوزیتی است [12].

در تمام آزمایش‌های ضربه صورت گرفته در این پژوهش، تمام انرژی توسط نمونه‌ها جذب شد. ولی میزان تخریب نمونه‌ها جهت تمام انرژی وارده، نشان دهنده کارایی نمونه در جذب انرژی بوده است. در جدول 2، پارامترهای جذب انرژی، برای هر آزمایش، آورده شده است.

جهت مقایسه میزان کارایی جذب انرژی نمونه‌های مختلف باهم، پارامتری به نام جذب انرژی ویژه وجود دارد که در معادله (3) بدان اشاره شده است. در جدول 2 نیز این پارامتر براساس معادله (3)، برای تمام آزمایش‌های ضربه محاسبه شده است. این پارامتر نشان‌دهنده میزان جذب انرژی برحسب یک واحد از نمونه کامپوزیتی است.

با مقایسه اعداد جذب انرژی برای نمونه‌ها آزمایش 3 و 4 با آزمایش 1 و 2، مشخص می‌شود که در نمونه‌هایی که با الیاف 200 gr/m^2 ساخته شده‌اند، تغییر چیدمان الیاف از $[90.0]$ به $[45\pm]$ باعث کاهش میزان جذب انرژی ویژه توسط نمونه می‌شود که نشان دهنده کاهش کارایی نمونه به عنوان جاذب انرژی است. اما در نمونه‌های ساخته شده توسط الیاف gr/m^2 400 این تغییر زاویه، منجر به افزایش میزان جذب انرژی ویژه می‌شود. دلیل این رویداد می‌تواند مربوط به ساختار دو نمونه باشد. نمونه‌های ساخته شده با الیاف 200 gr/m^2 با 50 درصد حجمی رزین ساخته شدند و الیاف تقویت کننده که وظیفه تحمل نیرو را برعهده دارد، 50 درصد ساختار نمونه را شامل می‌شد. در نتیجه، استحکام نمونه برابر با میانگین استحکام رزین و الیاف بود. همین امر باعث شد تا با تغییر زاویه چیدمان الیاف، استحکام نمونه کاهش پیدا کند. ولی در نمونه‌های ساخته شده با الیاف 400 gr/m^2 ، کسر حجمی الیاف بالاتر است. به همین دلیل در چیدمان $[45\pm]$ رزین، بهتر می‌توانست نیروی وارده را بین الیاف تقسیم کند و همین امر باعث افزایش مقاومت نمونه‌های $[45\pm]$ نسبت به نمونه‌های $[90,0]$ در نمونه‌های ساخته شده با الیاف 400 gr/m^2 شد.

¹ Crush force efficiency

² Stroke efficiency

³ Specific energy absorption

Table 2 Results from impact tests

شماره آزمایش	چگالی الیاف (gr/m ²)	میزان تخریب کلی نمونه (میلی‌متر)	مقدار تخریب در مرحله اول (میلی‌متر)	نیروی متوسط تخریب (کیلو نیوتن)	حداکثر نیروی تخریب (کیلو نیوتن)	بازده ضربه (در صد)	انرژی جذب شده ویژه (kJ/kg)	وزن میانگین نمونه‌ها (کیلوگرم)	انرژی ضربه (ژول)
1	200	55	18	20.5	21.7	55	47.67	0.043	981
2	400	32	15	40.5	41.7	32	51.92	0.078	981
3	200	64	19	17	18.1	64	39.53	0.043	981
4	400	26	13.5	46	48.2	26	58.97	0.078	981
5	200	57	16	18	18.7	57	46.94	0.034	981
6	200	61	17	25	25.8	61	58.14	0.043	1471.5
7	400	48	15	45	47.7	48	57.69	0.078	1471.5

تا 26" آورده شده است.

4- نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر، پارامترهای موثر بر رفتار لوله‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری به‌صورت ضربه‌ای بررسی شد. در این تحقیق، تاثیر پارامترهایی نظیر جنس الیاف، قطر داخلی نمونه، زاویه چیدمان الیاف و انرژی ضربه بر روی میزان جذب انرژی نمونه‌های ساخته شده از جنس الیاف شیشه و رزین اپوکسی که تحت بارگذاری دینامیکی سرعت پایین با دستگاه ضربه سقوط وزنه بودند، مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر هستند:

➤ بررسی نتایج آزمون ضربه سقوط وزنه نشان داد که با تغییر چگالی الیاف به‌کار رفته در ساختار نمونه، از 200 gr/m² به 400 gr/m²، در عین ثابت ماندن پارامترهای دیگر نظیر تعداد لایه و قطر، نمونه ساخته شده، نیروی بیشتری را جهت شروع تخریب لازم دارد. همچنین افزایش چگالی الیاف در ساختار نمونه باعث تقویت ساختار نمونه و افزایش مقاومت نمونه شده است. اگرچه میزان انرژی ضربه برای هر دونه نمونه یکسان بود، ولی نمونه با الیاف چگال‌تر، تخریب کم‌تری و انرژی ویژه بیشتری داشت.

➤ تاثیر تغییر زاویه الیاف بر روی میزان جذب انرژی، برای نمونه‌های ساخته شده با الیاف 200 gr/m² با نمونه‌های ساخته شده با الیاف 400 gr/m² متفاوت بود. در نمونه‌ها با الیاف 200، تغییر زاویه چیدمان الیاف از [0.90] به [±45] باعث کاهش سطح نیروی موردنیاز برای تخریب نمونه و همچنین میزان انرژی جذب شده ویژه شد. در صورتی که برای نمونه‌ها با الیاف 400، تغییر زاویه چیدمان فوق، باعث بهبود اوضاع نمونه از لحاظ کارایی جذب انرژی شد. البته، درصد حجمی الیاف در ساختار نمونه، در این نتیجه بی‌تاثیر نیست.

➤ بررسی قطر داخلی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش قطر نمونه، در حالی که تعداد لایه‌ها و ارتفاع نمونه‌ها ثابت بود، میزان تخریب نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. اما با توجه به افزایش وزن نمونه، میزان جذب انرژی ویژه با افزایش قطر نمونه‌ها، نیز کاهش پیدا کرد.

➤ در طی انجام آزمایش‌های ضربه مشاهده شد که مود شکست برای غالب نمونه‌ها، مود شکست ترد، شامل برش عرضی و همچنین شکست پیش رونده همراه با مود بازشدگی است که با به‌وجود آمدن سطح مقطع قوه ای شکل، در عرض نمونه با یک یا چند ترک بین لایه ای و یا طولی، نمایان می‌گردد. ایجاد ترک داخلی در نمونه، مود باز شدگی، جدایش بین لایه‌ای، ترک طولی در راستای الیاف و نیز شکست ماتریس و برش الیاف، عواملی بودند که باعث جذب انرژی ضربه در نمونه‌ها می‌شوند.

در طی انجام آزمایش‌های ضربه مشاهده شد که مود شکست برای غالب نمونه‌ها، مود شکست ترد¹ شامل برش عرضی² و همچنین شکست پیش رونده همراه با مود بازشدگی³ بود که با به‌وجود آمدن سطح مقطع قوه‌ای شکل⁴ در عرض نمونه با یک یا چند ترک بین لایه‌ای و یا طولی، نمایان شد. ایجاد ترک داخلی در نمونه، مود بازشدگی، جدایش بین لایه ای⁵، ترک طولی در راستای الیاف و نیز شکست ماتریس و برش الیاف، عواملی بودند که باعث جذب انرژی ضربه در نمونه‌ها شدند. در ابتدای وارد شدن ضربه به نمونه، همان‌طور که در شکل الف برای تمام آزمایش‌ها دیده می‌شد، تکه‌های بسیار ریز ماتریس، از نمونه جدا شده و نیرو به الیاف وارد شد که این نیرو باعث خم شدن لایه‌ها به‌صورت برگی از ساقه، به داخل و بیرون نمونه و در نهایت ایجاد شکستگی در طول نمونه شد. در تمام نمونه‌ها، پس از ضربه، مشاهده شد که در اثر نیروی وارده به نمونه، تکه‌هایی از نمونه جدا شده و به بیرون پرتاب شدند. له‌شدگی لایه‌های میانی بر روی تنه نمونه، بیش‌ترین تاثیر را در مقاومت نمونه در برابر ضربه وارده و جلوگیری از ادامه پیش‌روی شکست در طول نمونه را داشت. تخریب در نمونه‌های ساخته شده با الیاف 400 gr/m²، در مقایسه با الیاف 200 gr/m²، پیش‌روی کم‌تری داشت. این رخداد، به دلایلی هم‌چون حجم بالای لایه‌های له شده در بدنه، نیاز به نیروی بالا برای شکست الیاف و جذب انرژی بیشتر توسط ترک‌های ایجاد شده طولی و عرضی و شکست الیاف، اتفاق افتاد (شکل 22 ج و د).

در "شکل 22 و 23"، برای آزمایش‌های 3 و 4، گسیختگی بیش‌تری در طی تخریب برای نمونه‌ها مشاهده شد. این گسیختگی، ناشی از برش الیاف در زاویه 45 درجه نسبت به نیروی وارده و برش طولی عمیق در راستای الیاف و در مقابل پیش‌روی تخریب بود. در "شکل 24" برای آزمایش‌های 5 ملاحظه می‌شود که مود بازشدگی و شکست طولی الیاف، با افزایش قطر داخلی نمونه، منظم‌تر اتفاق می‌افتد و این نظم باعث می‌شود تا تخریب، پس از اندکی از شروع شکست نمونه، به یک حالت پایدار پیش‌رونده⁶ برسد. برای نمونه‌های آزمایش 6 و 7، در "شکل 26 و 27" مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی ضربه، شکل تخریب، با نمونه‌های آزمایش 1 و 2 تفاوت چندانی ندارد. تنها تاثیر افزایش انرژی ضربه بر روی نمونه‌ها افزایش شکست عرضی الیاف و شکست ماتریس در راستای الیاف بود که موجب افزایش طول تخریب نمونه گردید.

¹ Brittle fracture

² Transverse shearing

³ Splaying mode

⁴ Wedge-shape

⁵ delamination

⁶ Steady-state progressive mode



Fig. 21 Failure mode of samples of test 1. a: moment of impact. B: end of impact. c & d: shape of the sample after impact.

شکل 21 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 1. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه



Fig. 22 Failure mode of samples of test 2. a: moment of impact. B: end of impact. c & d: shape of the sample after impact.

شکل 22 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 2. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه

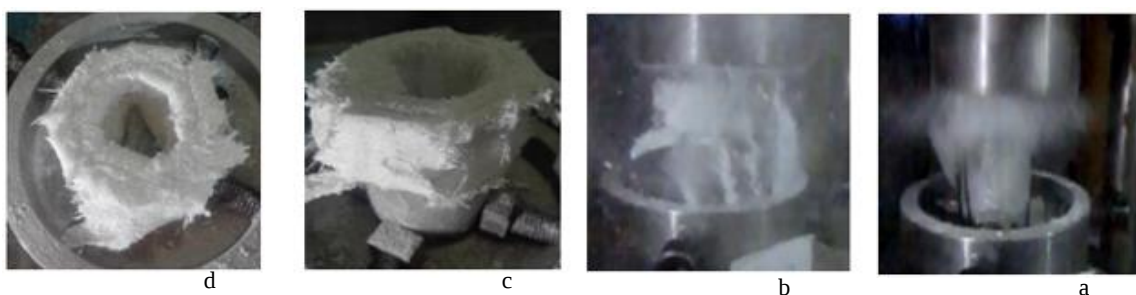


Fig. 23 Failure mode of samples of test 3. a: moment of impact. B: end of impact. c & d: shape of the sample after impact.

شکل 23 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 3. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه



Fig. 24 Failure mode of samples of test 4. a: moment of impact. B: end of impact. c & d: shape of the sample after impact.

شکل 24 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 4. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه

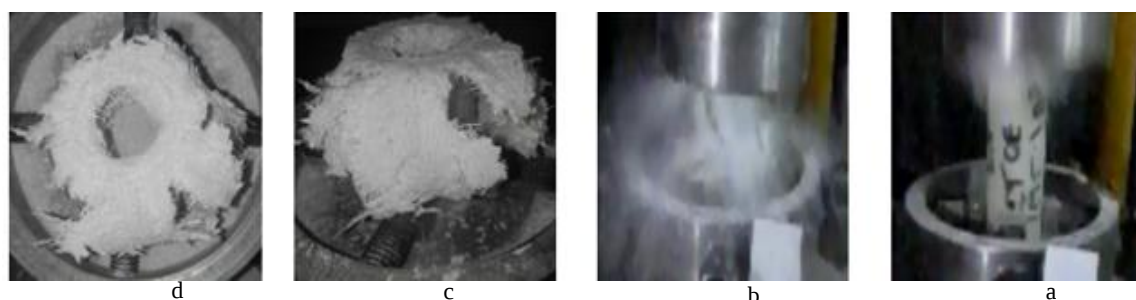


Fig. 25 Failure mode of samples of test 5. a: moment of impact. B: end of impact. c & d: shape of the sample after impact.

شکل 25 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 5. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه

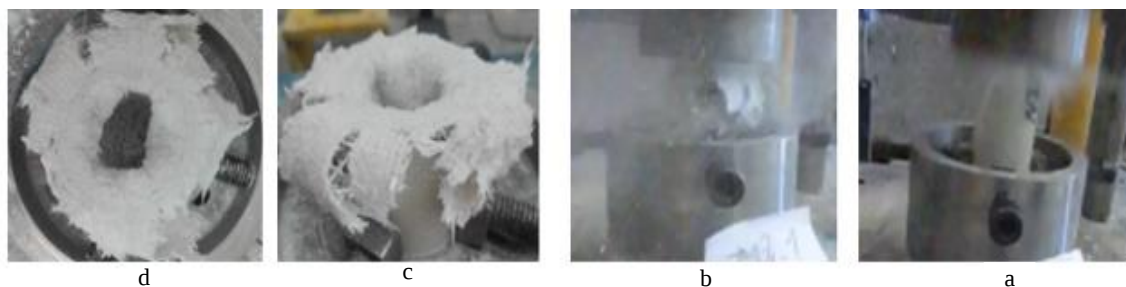


Fig. 26 Failure mode of samples of test 6. a: moment of impact. B: end of impact. c & d :shape of the sample after impact.

شکل 26 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 6. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه



Fig. 27 Failure mode of samples of test 6. a: moment of impact. B: end of impact. c & d :shape of the sample after impact.

شکل 27 حالت شکست نمونه‌های آزمایش 7. a: لحظه برخورد. b: پایان برخورد. c & d: شکل نمونه بعد از ضربه

of Materials Processing Technology, Vol. 172, No. 3, pp. 394-399, 2006.

- [11] J. S. Kim, H. J. Yoon, K. B. Shin, A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 198-207, 2011.
- [12] F. Taheri-Behrooz, R. A. Esmael, F. Taheri, Response of perforated composite tubes subjected to axial compressive loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 50, No. 1, pp. 174-181, 2012.
- [13] W. Wang, M. N. Sheikh, M. N. Hadi, Behaviour of perforated GFRP tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 95, No. 7, pp. 88-100, 2015.
- [14] Z. Ahmad, D. P. Thambiratnam, Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2393-2403, 2009.
- [15] M. Sadeghi, M. H. Pol, Investigation of behaviors of glass/epoxy laminate composites reinforced with carbon nanotubes under quasi-static punch shear loading, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 136, No. 2, pp. 124-136, 2017.
- [16] M. Sadeghi, M. H. Pol, Experimental studies on the punch shear characterization of glass/epoxy/CNTs laminate nanocomposites. *Polymer Composites*, Vol. 114, No. 9, pp. 16-27, 2017.
- [17] E. M. Yeganeh, G. H. Liaghat, M. H. Pol, Laminate composites behavior under quasi-static and high velocity perforation, *Steel and Composite Structures*, Vol. 22, No. 4, pp. 777-796, 2016.
- [18] X. Xiao, C. McGregor, R. Vaziri, A. Poursartip, Progress in braided composite tube crush simulation. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 5, pp. 711-719, 2009.
- [19] G. L. Farley, Effect of crushing speed on energy absorption capability of composite tubes, *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, No. 9, pp. 1314-29, 1991.
- [20] P. H. Thornton, R. Jeryan, Crash energy management in composite automotive structures, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 7, No. 14, pp. 167-80, 1988.

5- مراجع

- [1] G. A. O. Davies, R. Olsson, Impact on composite structures, *The Aeronautical Journal*, Vol. 108, No. 1089, pp. 541-563, 2004.
- [2] M. M. Shokrieh, M. J. Omid, The Impact resistance of fiber-reinforced polymer composites: A review, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 255-277, 2011. (in Persian)
- [3] S. Abrate, *Impact on Composite Structures*, Cambridge university press, First edition, pp. 32-40, New York, 2005.
- [4] L. N. Chiu, B. G. Falzon, D. Ruan, S. Xu, R. S. Thomson, B. Chen, W. Yan, Crush responses of composite cylinder under quasi-static and dynamic loading, *Composite Structures*, Vol. 14, No. 131, pp. 90-98, 2015.
- [5] M. Moeinifard, G. Liaghat, G. Rahimi, A. Talezadehlari, H. Hadavinia, 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, 2016.
- [6] M. E. Deniz, M. Ozen, O. Ozdemir, R. Karakuzu, B. M. Icten, Environmental effect on fatigue life of glass-epoxy composite pipes subjected to impact loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 25, No. 44(1), pp. 304-312, 2013.
- [7] E. Mahdi, A. M. S. Hamouda, T. A. Sebaey, The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes, *Materials & Design*, Vol. 56, No. 6, pp. 923-928, 2014.
- [8] M. Kara, M. Uyaner, A. Avci, Repairing impact damaged fiber reinforced composite pipes by external wrapping with composite patches. *Composite Structures*, Vol. 123, No. 14, pp. 1-8, 2015.
- [9] E. Mahdi, T. A. Sebaey, An experimental investigation into crushing behavior of radially stiffened GFRP composite tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol. 76, No. 2, pp. 8-13, 2014.
- [10] E. F. Abdewi, S. Sulaiman, A. M. S. Hamouda, E. Mahdi, Effect of geometry on the crushing behaviour of laminated corrugated composite tubes, *Journal*