



تحلیل عددی و تجربی استحکام کمانشی سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی قبل و بعد از اعمال ضربه عرضی سرعت پایین

احمد گرامی¹، علی داور^{2*}، محسن حیدری بنی³، جعفر اسکندری جم⁴

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

2- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

3- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری های ساخت

* تهران، صندوق پستی 15875-1774، a_davar@mut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در چند دهه گذشته، مواد کامپوزیتی به دلیل استحکام و سفتی ویژه بالا مورد توجه و علاقه محققین درباره سازه‌های سبک قرار گرفت. در این بین، سازه‌های مشبک و تقویت شده کامپوزیتی به عنوان یک ساختار بسیار کارآمد، به خصوص در تحمل بارهای فشاری محوری مطرح شدند. در این پژوهش، چند هدف اصلی دنبال شده است: (1) آنالیز استوانه مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری، (2) آنالیز استوانه مشبک کامپوزیتی تحت بار ضربه عرضی سقوط آزاد و مطالعه آسیب ناشی از آن، (3) آنالیز اثر ضربه عرضی سقوط آزاد بر حداکثر استحکام سازه در بارگذاری محوری فشاری. برای نیل به اهداف فوق، از روش المان محدود و روش تجربی استفاده شده است. در روش المان محدود، از نرم‌افزار آباکوس برای تعیین حداکثر مقدار قابل تحمل بار محوری فشاری توسط سازه و همچنین پاسخ ضربه عرضی، جذب انرژی سازه و آسیب ناشی از ضربه استفاده شده است. در روش تجربی، ابتدا به ساخت دو نمونه استوانه مشبک کامپوزیتی از جنس کولار/اپوکسی پرداخته شده است. سپس این نمونه‌ها مورد بارگذاری ضربه عرضی و آزمون بار محوری فشاری (قبل و بعد از اعمال ضربه و بروز آسیب) قرار گرفته‌اند. در نهایت، نتایج این دو روش، شامل نیرو و زمان برخورد و ناحیه آسیب دیده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که علی‌رغم اینکه ضربه سقوط آزاد (با یک انرژی معلوم) به سازه آسیب می‌زند، ولی سبب افت قابل ملاحظه‌ای در حداکثر استحکام استوانه مشبک، در بارگذاری محوری فشاری نمی‌شود.

دریافت: 1399/10/20

پذیرش: 1400/03/30

کلیدواژگان:

استحکام کمانشی

پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی

بارگذاری ضربه‌ای

روش المان محدود

روش تجربی

Numerical and Experimental Buckling Strength Analysis of Composite Grid Stiffened Cylindrical Shells Before and After Applying Low-Velocity Transverse Impact

Ahmad Gerami, Ali Davar*, Mohsen Heydari Beni, Jafar Eskandari Jam

Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technologies, Iran

* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, a_davar@mut.ac.ir

Keywords

Buckling strength
Composite grid stiffened cylindrical shells
Transverse impact
Finite element method
Experimental method.

Abstract

Composite materials became a great interest of researchers on light weight structures during the last decades due to their high specific strength and high specific stiffness. Lattice and grid stiffened structures are one of these efficient composite structures especially for axial compressive loads. In this research, the following main objectives are followed: (1) The buckling strength analysis of the lattice cylinders subjected to axial compressive force, (2) The impact response and damage analysis of the lattice cylinders subjected to the transverse impact of a falling object, (3) The buckling strength analysis of the lattice cylinders subjected to axial compressive force after applying transverse impact to the structure. In order to achieve the above purposes, the finite element and the experimental methods are used. In the finite element method, ABAQUS software is used to find maximum axial strength of the structure and the impact results of the structure due to its energy absorption and damage properties. In the experimental method, first, two samples of the lattice composite cylinders are made of Kevlar/Epoxy material and then they are subjected to impact test and also buckling strength tests before and after applying transverse impact when damage occurs in the lattice structure. Finally, the results of these two methods, including impact force, impact time and damage area have been compared. Results show that the damage of the structure due to the impact test, do not causes the maximum buckling strength of the structure to be reduced significantly.

1- مقدمه

کسی پوشیده نیست. تحلیل دینامیکی و پایداری سازه‌های هوافضایی، همواره جزئی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی یک سازه پد شرفته هوافضایی است.

امروزه اهمیت و کاربرد سازه‌های مشبک، به خصوص در صنعت هوافضا، بر

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Gerami, A., Davar, A., Heydari beni, M., and Eskandari jam, J., "Numerical and Experimental Buckling Strength Analysis of Composite Grid Stiffened Cylindrical Shells Before and After Applying Low-Velocity Transverse Impact ", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1363-1372, 2021.

همچنین ناهمگنی مواد کامپوزیتی مورد استفاده در این سازه‌ها پیش‌بینی رفتار آنها را دشوار می‌کند و ممکن است طراحی را به چالش بکشاند. معمولاً سازه‌های کامپوزیتی حین سرویس و نگهداری ممکن است در معرض اعمال ضربات ناگهانی قرار گیرند. آسیب ناشی از این ضربات، ممکن است تحمل بار سازه را با مشکل مواجه کند. از طرفی محاسبه و تخمین بارهای بحرانی کمانش، در طراحی سازه‌های هوافضایی از اهمیتی ویژه برخوردار است. توتارو و گوردال، بهینه‌سازی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری بر مبنای پارامترهای مؤثری نظیر عرض سطح مقطع ریب‌های مارپیچ و محیطی و فاصله ریب‌ها را بر مبنای روش‌های عددی بر روی شبکه‌بندی شش ضلعی با ابعاد خاص، انجام دادند و نقاط طراحی مناسب را تعیین نمودند [1]. موروزوف و همکارانش، بررسی سازه‌های بر روی رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای و مخروطی تحت بارگذاری‌های مختلف اعم از بارگذاری محوری فشاری، بارگذاری خمشی و بارگذاری پیچشی، به صورت عددی و با استفاده از مدل‌های المان محدود انجام دادند. آن‌ها ریب‌ها را با المان‌های beam مدل کردند و زاویه پیچش مارپیچ ریب‌ها برای سازه مشبک را در محدوده 30 تا 35 درجه، مناسب تشخیص دادند. آن‌ها همچنین، اثرات طول پوسته، تعداد ریب‌ها و زاویه جهت‌گیری ریب‌ها را بر روی رفتار کمانشی این سازه‌ها بررسی کردند [2]. کانتول و مورتن، مودهای آسیب (کمانش الیاف، ترک‌خوردگی و شکست زمینه، مودهای تخریب برشی، جدایش لایه‌ها، جدایش تقویت‌کننده‌ها از پوسته و ترکیبی از حالات فوق) را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در نمونه‌های نازک، آسیب اولیه در لایه‌های پایینی رخ می‌دهد، درحالی که در نمونه‌های ضخیم، آسیب اولیه به لایه‌های بالایی مربوط می‌شود. مقاومت‌های فشاری و کششی باقیمانده لایه‌های کامپوزیتی به وسیله سطح آسیب و مکانیزم برخورد تحت تأثیر قرار می‌گیرند [3]. داور و همکارانش، رفتار فشاری سازه‌های مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی با و بدون نانولوله کربنی به عنوان تقویت‌کننده، به روش تجربی و عددی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن 2٪ وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی در حین ساخت، نیروی قابل تحمل بی‌شینه را حدود 44٪ افزایش می‌دهد [4]. سانچز و همکارانش، به توسعه روش عددی که قدرت پیش‌بینی آسیب ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالا روی اهداف کامپوزیتی کربن اپوکسی را داشت، پرداختند. در این شبیه‌سازی در حالات نفوذ کامل، سرعت خروجی و سطح شکست محاسبه و نتایج با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شد [5]. هال و گادن، مقاومت ضربه کامپوزیت‌های تک‌جهتی کربن اپوکسی را در آزمون‌های سرعت کرنش کم تا زیاد، بررسی کردند. آزمون‌ها در سرعت‌های کرنش زیاد، با استفاده از روش میله هاپکینسون نوع فشاری، در محدوده گسترده از سرعت کرنش تا 2000s^{-1} انجام شده است. نتایج پژوهش، افزایش 67.4٪ در استحکام تخریب در جهت عرضی نشان داد. در حالی که تغییر قابل توجهی در مدول یانگ با افزایش سرعت کرنش مشاهده نشده است. در این پژوهش، در محدوده سرعت کرنش بررسی شده، مقدار کرنش شکست، تقریباً ثابت ($0.3\% \pm 5$) گزارش شده است [6]. سنکار و سان در بررسی ضربه عرضی، از روش جالبی برای حل یک معادله انتگرالی غیرخطی که همواره در بررسی مسائل ضربه بوجود می‌آید، استفاده نمودند. آنان در حل این معادله انتگرالی که تعیین‌کننده منحنی نیرو است، زمان را به Δt ‌های کوچک تقسیم کرده و در هر Δt تغییرات نیرو را به صورت خطی در نظر گرفته‌اند. سپس با این تابع نیروی تقریبی، معادله انتگرالی را حل نموده‌اند. نتیجه کار این دو پژوهشگر، تعیین منحنی نیرو برای مسأله ضربه بر روی تیر می‌باشد. همچنین اثرات

تقسیم‌بندی روی زمان را نیز بررسی و به صورت نمودارهایی نشان داده‌اند [7]. کیم و جان ورق‌های ساندویچی کامپوزیت ساخته شده از جوجه گرافیت/اپوکسی و هسته‌های لانه زنبوری از جنس نومکس را تحت بار ضربه‌ای مورد مطالعه قرار داده و اندازه و شکل جدا شدن لایه‌ها از هم را تحت بار ضربه و به صورت تجربی اندازه‌گیری نموده‌اند [8]. لی هوانگ و فان ورق‌های ساندویچی کامپوزیت را تحت بار ضربه مطالعه نمودند. این دو محقق، ورق ساندویچی را توسط دو ورق میندلین جداگانه مدل نموده و فرض نموده‌اند که در هر سطح برش عرضی و سختی نرمال وجود داشته است. این مدل اجازه بررسی تغییر شکل نسبی دو وجه تحت بار متمرکز را نشان می‌دهد. اهمیت این نکته از آن رو است که وجه تحت بار ضربه، رفتاری متفاوت از وجه دیگر دارد. آن‌ها از روش المان محدود برای تحلیل ضربه استفاده نموده و نتایج به دست آمده برای پروفیل کرنش بر حسب زمان را با نتایج آزمایشات ضربه بر روی ورق ساندویچی ساخته شده از جوجه گرافیت/اپوکسی و هسته صلب مقایسه کرده و گزارش نموده‌اند که مدل به کار رفته می‌تواند رفتار دینامیکی ورق ساندویچی کامپوزیت را نسبت به ضربه با سرعت کم به نحو مطلوب توضیح دهد. این پژوهشگران همچنین اثر سرعت و جرم جسم ضربه زننده را بررسی نموده‌اند [9]. وو و شیو ورق‌های کامپوزیت تحت بار ضربه کره‌های صلب با سرعت کم را بررسی و گزارش نموده‌اند. پدیده تماس در مورد فرورفتگی‌های کوچک و بزرگ متفاوت می‌باشد و این به دلیل ایجاد شکست در لایه‌ها است. در مرحله اولیه فرورفتگی، زمانی که در ورق، شکست ایجاد نشده، تغییر ترتیب چیدن لایه‌ها، دارای اثر جزئی بر روی رابطه نیرو و فرورفتگی می‌باشد و بعد از مرحله فرورفتگی اولیه، تخریب اتفاق می‌افتد و نیز اندازه ناحیه ورقه شدن لایه‌ها، متناسب با بار اعمالی و تعداد سیکل‌های بارگذاری می‌باشد [10]. زمانی و خلیلی به بررسی اثر پوسته خارجی بر استحکام کمانشی استوانه‌های مشبک کامپوزیتی به روش عددی و تجربی پرداختند. نتایج بررسی‌های آزمایشی و عددی، تطابق خوبی با یکدیگر نشان داد و مشاهده شد که نمونه پوسته استوانه‌ای مشبک با پوسته خارجی دارای استحکام کمانشی بسیار بالاتری از نمونه بدون پوسته خارجی (50 درصد) است. وزن اضافه شده پوسته خارجی در مقایسه با وزن کلی پوسته استوانه‌ای شبکه، ناچیز بود و پوسته خارجی، تأثیر مثبت فوق‌العاده‌ای بر استحکام کمانشی ساختارهای مشبک کامپوزیتی داشت [11]. معینی فرد و همکاران، به بررسی تجربی انرژی جذب شده و نیروی تماسی پوسته کامپوزیتی بدون تقویت‌کننده و با تقویت‌کننده شبکه‌ای تحت فشار جانبی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده، در برابر بارگذاری جانبی، مستحکم‌تر از پوسته‌های استوانه‌ای بدون تقویت‌کننده است [12]. دیوید و همکاران به بررسی تأثیر جهت الیاف بر روی مقاومت و رفتار استوانه‌های کامپوزیتی در برابر ضربه پرداختند. نتایج مطالعه نشان دادند که جهت لایه‌چینی در کامپوزیت‌های نیمه منحنی به طور قابل توجهی در جذب انرژی تأثیرگذار است [13]. محمدی و همکارانش به بررسی رفتار الیاف کربن و کولار در استوانه کامپوزیتی تحت ضربه سرعت پایین به روش تجربی و عددی پرداختند. نتایج نشان دادند که نمونه کربن دارای نیروی تماس بالاتر و جابجایی کمتر بین تمامی نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد. علاوه بر این، نمونه کولار دارای کمترین مقدار نیروی تماس و بی‌شترین جابجایی می‌باشد [14]. آدرازا و همکارانش، در پژوهشی به تحلیل دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت ضربه مایل سرعت پایین توسط یک ضربه زننده کروی به دو روش تحلیلی و عددی پرداخته‌اند. آنان اثر پارامترهای هندسی پوسته مانند نسبت طول به شعاع، نسبت ضخامت به شعاع و همچنین اثر پارامترهای ضربه

- امکان شکل دادن راحت و در دست‌یافت در موقعیت شیارها و در نتیجه تأمین خواص مکانیکی و کیفیت عالی ریب‌ها
 - هزینه پایین‌تر نسبت به دیگر روش‌های دقیق (به دلیل حذف فرآیند ماشین‌کاری)
 - امکان جداسازی بسیار راحت و سریع قطعه نهایی از قالب
 - امکان تولید چندین قطعه با یک قالب بر خلاف قالب‌های فومی
- در این روش، به یک قالب سیلیکونی برای شکل دادن دقیق الیاف آغشته به رزین نیاز است و پس از فراهم کردن آن، به کمک دستگاه رشته پیچی، الیاف به داخل این شیارها هدایت می‌شوند. پس از پخت کامل رزین، سازه از درون قالب به بیرون کشیده می‌شود.
- برای ساخت یک قالب سیلیکونی دقیق، قبل از هرچیز، نیاز به یک قالب دقیق می‌باشد. برای این کار، از یک ورق پلکسی گلاس به ضخامت 4 میلیمتر استفاده شده است. با توجه به حساسیت موضوع و دقت بالای کار، از دستگاه لیزر برای برش و ساخت قالب استفاده شده است. (شکل 1)

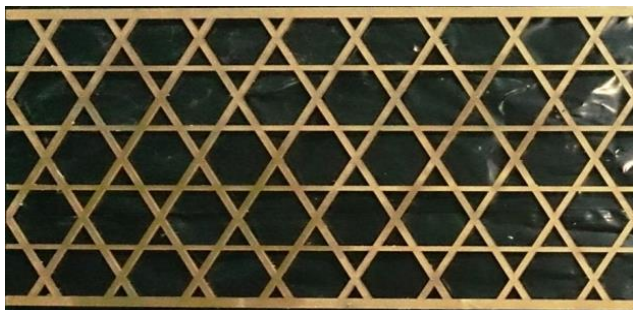


Fig. 1 Plexiglass mold

شکل 1 قالب پلکسی گلاس

پس از ساخت قالب، سیلیکون به داخل آن ریخته شده، پس از گذشت دو روز کامل، زمانی که پخت کامل شود، اقدام به درآوردن سیلیکون از درون قالب پلکسی گلاس شده است. (شکل 2)



Fig. 2 Baked Plexiglass mold

شکل 2 قالب سیلیکونی پخت شده

با پیچاندن کردن قالب سیلیکونی مذکور به دور لوله‌ای استوانه‌ای، مندرل اصلی آماده عملیات رشته پیچی شده است. برای انجام عملیات رشته پیچی، از یک دستگاه شش درجه آزادی تمام اتوماتیک استفاده شده است. این دستگاه، با دقت و سرعت بالایی الیاف کولار آغشته به رزین را داخل شیارهای ایجاد شده بر روی مندرل هدایت می‌کند. (شکل 3) تمامی ریب‌های مارپیچ و محیطی، دارای ضخامت چهار میلی‌متری می‌باشند که از پیچش ده لایه الیاف رشته‌ای آغشته شده به رزین در داخل شیارهای به عمق چهار میلی‌متر روی قالب سیلیکونی متصل شده بر روی مندرل ساخته شده‌اند. لذا رشته‌های

زننده شامل سرعت و زاویه برخورد ضربه زننده را بر روی پاسخ ضربه بررسی کردند. نتایج نشان دادند با افزایش نسبت طول به شعاع پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی، از دو تا پنج برابر، مدت زمان برخورد، حدوداً یک سوم برابر می‌شود. با افزایش سرعت ضربه زننده، ماکزیم نیرو و ماکزیم خیز افزایش می‌یابند. با افزایش زاویه برخورد ضربه زننده از صفر درجه به سمت 90 درجه، ماکزیم نیرو و ماکزیم خیز کاهش یافته ولی مدت زمان تماس تقریباً ثابت باقی مانده است [15]. داور و همکارانش، به دو روش تجربی و عددی به مطالعه ضربه سرعت پایین بر روی پائل ساندویچی با هسته مشبک پرداختند. آنان برای شبیه‌سازی عددی، از انواع المان‌های سه بعدی و حل آسیب پیش‌رونده به کمک زیربرنامه‌نویسی با زبان فرترن در نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند. نتایج نشان داد که در اثر ضربه روی نقاطی مانند محل تقاطع ریب‌ها که نسبت به فضای بین ریب‌ها، از سفتی بیشتری برخوردارند، مدت زمان برخورد کاهش و حداکثر نیروی تماس افزایش می‌یابد [16].

هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر آسیب ناشی از ضربه جانبی بر استحکام کمانشی سازه استوانه مشبک کامپوزیتی تحت نیروی محوری فشاری بوده است. برای نیل به اهداف فوق، از روش المان محدود و روش تجربی استفاده شده است. در روش المان محدود، از نرم‌افزار آباکوس برای تعیین حداکثر مقدار قابل تحمل بار محوری فشاری توسط سازه و همچنین پاسخ ضربه جانبی، جذب انرژی سازه و آسیب ناشی از ضربه استفاده شده است. در روش تجربی، ابتدا به ساخت دو نمونه استوانه مشبک کامپوزیتی از جنس کولار/اپوکسی پرداخته شده است. سپس، دو نمونه سازه استوانه‌ای کامپوزیتی از جنس کولار/اپوکسی، به دو روش تجربی و المان محدود تحلیل قرار گرفته‌اند. در نمونه اول، سازه بدون اعمال ضربه جانبی، فقط تحت نیروی محوری فشاری قرار گرفته است. در نمونه دوم، پس از اعمال ضربه جانبی، تحت نیروی محوری فشاری قرار گرفته است تا با مقایسه نتایج با نمونه اول، اثر ضربه جانبی بر قابلیت تحمل بار محوری فشاری سازه، به دو روش تجربی و المان محدود مورد ارزیابی قرار گیرد.

2- روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش شامل دو بخشی اصلی می‌باشد: (1) شبیه‌سازی عددی کمانش محوری و ضربه جانبی در سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی و همچنین اثر آسیب ناشی از ضربه جانبی بر روی استحکام کمانشی سازه، با نرم‌افزار المان محدود آباکوس، (2) فرآیند ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمون‌های کمانش و ضربه سقوط آزاد بر روی آنها.

2-1- معرفی سازه

سازه مورد نظر یک سازه استوانه‌ای مشبک می‌باشد که از هشت جفت ریب (تقویت‌کننده) مارپیچ و شش ریب (تقویت‌کننده) محیطی تشکیل شده است. از به هم رسیدن این ریب‌های مارپیچ و محیطی، شبکه‌های ایزوگرید شکل می‌گیرد. به منظور معرفی هندسه این سازه‌ها، از پارامترهای مشخصی استفاده شده است که در جدول 1، این پارامترها برای سازه مذکور ارائه شده است.

2-2- فرآیند ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، برای ساخت نمونه، از روش رشته پیچی درون یک قالب سیلیکونی شیاردار استفاده شده است. مزیت‌های این روش عبارتند از:

به استحکام نهایی خود رسید، هنوز می‌تواند مقاومت از خود نشان دهد و کاهش خواص، بعد از شروع آسیب، به صورت تدریجی است، تا اینکه در چهار حالت ذکر شده در بالا، ماده به واماندگی برسد. خواص و جهت مواد، مطابق جدول 2 به ناحیه ریب‌های مارپیچ و محیطی نسبت داده شده است.

جدول 2 خصوصیات مواد

Table 2 The material properties

چقرمگی	استحکام	خصوصیات الاستیک
شکست	(MPa)	
(N/mm)		
$G_{ft}=70$	$X_t=900$	$E_1=40$ GPa (مدول الاستیک در راستای الیاف)
$G_{fc}=95$	$X_c=310$	$E_2=4.6$ GPa (مدول الاستیک عمود بر الیاف)
$G_{mt}=0.25$	$Y_t=30$	$G_{12}=G_{13}=2.5$ GPa (مدول برشی)
$G_{mc}=1$	$Y_c=100$	$G_{23}=2$ GPa (مدول برشی)
	$Z_t=50$	$\nu_{12}=0.38$ (ضریب پواسون)
	$Z_c=50$	$\rho=1.48$ kg/m ³ (چگالی)

در جدول 2، X_t استحکام نهایی کششی طولی، استحکام نهایی فشاری طولی، Y_t استحکام نهایی کششی عرضی، Y_c استحکام نهایی فشاری عرضی، Z_t استحکام برشی طولی، Z_c استحکام برشی عرضی، G_{ft} چقرمگی شکست الیاف در حالت کشش، G_{fc} چقرمگی شکست الیاف در حالت فشار، G_{mt} چقرمگی شکست زمینه در حالت کشش و G_{mc} چقرمگی شکست زمینه در حالت فشار است.

در این تحلیل، از حلگر دینامیک صریح¹ استفاده شده است. به طوری که برای شبیه‌سازی بارگذاری فشاری محوری بر روی سازه، بعد از اعمال ضربه عرضی، از دو گام² متوالی در داخل نرم‌افزار استفاده شده است. به طوری که در گام اول، ضربه عرضی اعمال می‌شود و سپس در گام دوم، بارگذاری فشاری محوری بر روی سازه اعمال می‌شود. برای اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در شبیه‌سازی بارگذاری محوری فشاری، از دو صفحه صلب در قسمت بالا و پایین سازه استفاده شده است که درجه آزادی صفحه پایینی کاملاً بسته شده است و درجه آزادی صفحه بالایی، فقط در جهت محور سازه باز می‌ماند. همچنین، برای شرایط مرزی در مسئله شبیه‌سازی ضربه عرضی، از یک صفحه صلب گهواره‌ای شکل استفاده شده است. کلیه تماس‌های بین سازه، صفحات صلب و گلوله ضربه زننده از نوع صفحه به صفحه با ضریب اصطکاک 0.5 تعریف شده است [18]. در شکل 5، نمایی از شرایط مرزی و بارگذاری نشان داده شده است. برای مش‌بندی سازه از المان‌های S4R استفاده شده است. این المان‌ها، پو سته‌ای چهار گره‌ای می‌باشند و برای هر دو نوع پو سته‌های نازک و ضخیم استفاده می‌شوند. شایان ذکر است که به منظور همگرایی جواب‌های مسئله، حل‌های متعددی با تعداد المان‌های متفاوت، انجام شده که در نهایت، تعداد بهینه المان‌ها، 12408 عدد انتخاب شده است. نمایی از مدل مش‌بندی سازه در شکل 4 نمایش داده شده است.

الیاف در فرآیند رشته پیچی، داخل شیارهای سیلیکونی (در جهت ریب‌ها) قرار گرفته‌اند. همانطور که در جدول 1 هم به زاویه الیاف اشاره شده، زاویه این شیارها با راستای قائم در شکل‌های 1 و 2 و با راستای محور مندرل در شکل 3، 28.2 درجه است.



Fig. 3 Twisting machine

شکل 3 دستگاه رشته‌پیچی

در ساخت نمونه‌ها، از رزین اپوکسی به نام تجاری ME101 استفاده شده است. برای پخت کامل این رزین، مطابق اطلاعات شرکت سازنده، هفت روز زمان در دمای محیط لازم است. پس از پایان این مدت زمان با تخریب مندرل، نمونه از داخل قالب سیلیکونی خارج شده است.

جدول 1 مشخصات هندسی شبکه و سازه

Table 1 Geometric characteristics of grids and structures

مشخصات سازه	ارتفاع سازه (L) (mm)	300
	شعاع سازه (R) (mm)	81.9
	فاصله ریب‌های مارپیچ (a _n) (mm)	56.73
	فاصله ریب‌های محیطی (a _c) (mm)	60
مشخصات هندسی شبکه	عرض ریب‌های مارپیچ (b _n) (mm)	5
	عرض ریب‌های محیطی (b _c) (mm)	5
	ضخامت لایه مشبک (H) (mm)	4
	زاویه ریب‌های مارپیچ (φ) (mm)	28.2

3-2- مدل‌سازی و تحلیل المان محدود

در مدل‌سازی این سازه، از المان‌های پوسته‌ای استفاده شده است. در ابتدا، هنده یک پوسته استوانه‌ای به طول و شعاع سازه اصلی، ایجاد شده است. با توجه به مشخصات هندسه سازه و شبکه آن، نقاطی در قسمت ابتدایی و انتهایی این پوسته استوانه‌ای ایجاد شده‌اند. این نقاط، بر اساس الگوی شبکه و گام ریب‌ها، با استفاده از کوتاه‌ترین مسیر منحنی بین آن‌ها (مسیر ژئودزیک) یک به یک به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل 4). در انتها، قسمت‌های اضافی سازه، حذف شده‌اند. برای سازه، آسیب تعریف شده است که از معیار شروع آسیب و پیشرفت آسیب هاشین استفاده شده است. پیشرفت آسیب بر حسب انرژی شکست، مربوط به چهار حالت آسیب، یعنی کشش الیاف، فشار الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه است. پیشرفت آسیب به این معناست که زمانی که ماده،

² Step¹Explicit

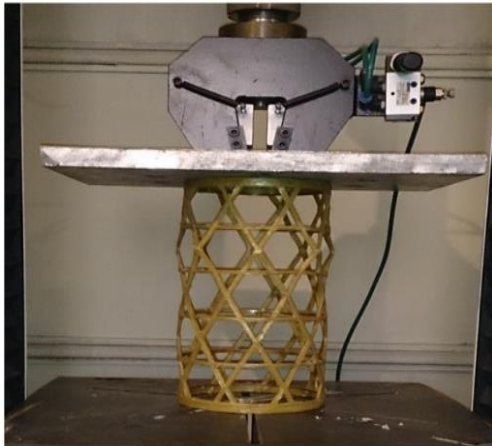


Fig. 6 Failure of the structural under axial compressive load before applying lateral impact

شکل 6 شکست سازه تحت بار محوری فشاری، قبل از اعمال ضربه جانبی

در شبیه‌سازی المان محدود، سازه به صورت غیرخطی مورد تحلیل بارگذاری محوری فشاری قرار گرفته، نتایج استخراج شده‌اند. شرایط مرزی در این شبیه‌سازی، همانند شرایط مرزی واقعی حاکم بر مسأله می‌باشد به طوری که دو صفحه صلب، در قسمت زیرین و بالایی سازه قرار می‌گیرد و کلیه درجات آزادی صفحه زیرین، در نرم افزار بسته می‌شود و به صفحه بالایی اجازه جابجایی در راستای محوری سازه داده می‌شود. به منظور تعیین مود دقیق شکست، در این شبیه‌سازی استحکام نهایی مواد نیز در نرم‌افزار وارد شده است تا مود واقعی شکست مشخص شود. در شکل 7، نمودارهای انرژی درونی و جنبشی سازه (برای حالت با آسیب) ارائه شده است. با توجه به کوچک بودن مقادیر انرژی جنبشی در مقایسه با انرژی درونی سازه، مشخص می‌شود که شبیه‌سازی انجام گرفته، کاملاً شبه‌استاتیکی می‌باشد. در شکل 8، سازه شبیه‌سازی شده به همراه مود شکست آن (مود شکست فشاری الیاف) ارائه شده است. از این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که قبل از اینکه سازه دچار کمانش کلی شود، تنش در سازه، از حداکثر استحکام فشاری سازه، فراتر رفته (سازه دچار آسیب شده) و این عامل، سبب شکست سازه شده است. در واقع، سازه از نظر استحکام ماده، به حداکثر قابلیت تحمل بار رسیده و دچار شکست شده و کمانش کلی اتفاق نیفتاده است. بلکه به خاطر بروز آسیب ناگهانی استحکام فشاری پایین کامپوزیت کولاراپوکسی در برخی نقاط، تغییر شکل موضعی به صورت بیرون‌زدگی ریب‌ها رخ داده است و تغییر شکل و محل شروع شکست سازه، در هر دو روش شبیه‌سازی المان محدود و تست تجربی، دارای تطابق کامل می‌باشد.

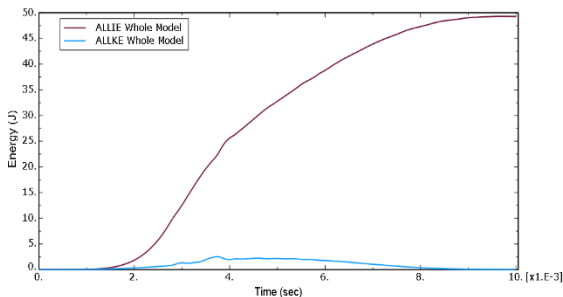


Fig. 7 Diagram of internal energy-time and kinetic energy-time of the structure

شکل 7 نمودار انرژی درونی-زمان و انرژی جنبشی-زمان سازه

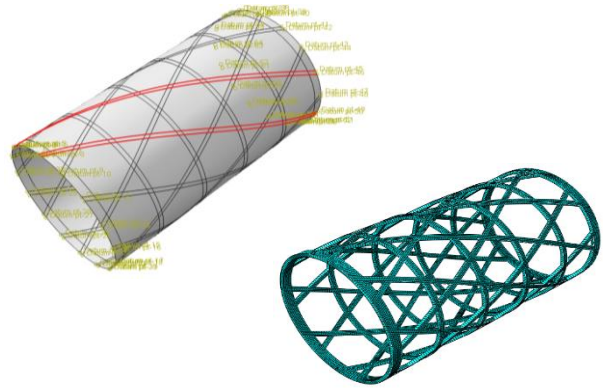


Fig. 4 Geometrial model and elements mesh of the structure

شکل 4 مدل هندسی و المان‌بندی سازه

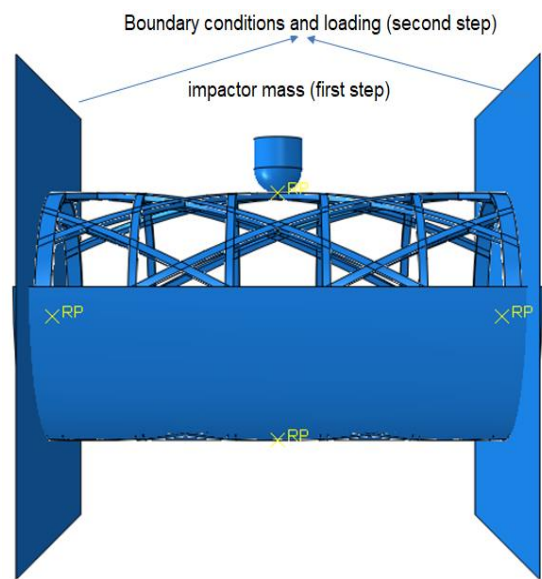


Fig. 5 Boundary conditions and loading on the structure

شکل 5 شرایط مرزی و بارگذاری بر روی سازه

3- بحث و نتایج

3-1- بررسی نتایج تست تجربی و شبیه‌سازی المان محدود سازه در بارگذاری

محوری فشاری، قبل از اعمال ضربه عرضی

برای انجام تست تجربی سازه تحت بار محوری فشاری، دو صفحه فولادی مسطح، در قسمت‌های زیرین و روپین نمونه‌ها قرار گرفت تا توزیع بار وارد شده به نمونه‌ها، یکنواخت باشد. سپس، به کمک متحرک دستگاه، جابجایی با سرعت نیم میلی‌متر بر دقیقه داده شد تا بار وارده به سازه، کاملاً شبه‌استاتیکی باشد. تست، تا جایی که نمودار نیرو-جابجایی سازه، دچار افت محسوس شد (حداکثر تحمل بار محوری فشاری سازه) ادامه یافت. بر طبق این نمودار، مقدار نیروی بحرانی کمانش (جایی که نمودار نیرو-جابجایی افت ناگهانی کرده است) برابر 10505 نیوتن می‌باشد.

در شکل 6 نمایی از سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی، قبل از اعمال ضربه جانبی، بعد از شکست تحت بار محوری فشاری ارائه شده است.

تأثیر ضربه عرضی و آسیب ناشی از آن بر حداکثر بار بحرانی کمانشی سازه است، انرژی جسم ضربه‌زننده به حد کافی افزایش داده شد، تا آسیب جدی به سازه وارد شود. برای این مهم دو راهکار وجود دارد، اول افزایش جرم جسم ضربه‌زننده و دوم افزایش سرعت جسم ضربه‌زننده. با مطالعات انجام شده در این زمینه و شبیه سازی‌های المان محدود مقدماتی، هردوی این مقادیر، افزایش داده شدند.

افزایش سرعت جسم ضربه‌زننده، تأثیری مستقیم بر مقادیر شتاب‌ها می‌گذارد و با توجه به محدودیت دستگاه تست ضربه، ناگزیر جرم جسم ضربه‌زننده افزایش داده شد. چرا که این پارامتر تأثیر کمتری بر مقادیر شتاب‌های خروجی دارد. به این ترتیب، جرم جسم ضربه‌زننده از 2.27 به 10 کیلوگرم و سرعت آن، از 1.5 به 2.4 متر بر ثانیه افزایش داده شدند. پس از اعمال ضربه عرضی با جرم 10 کیلوگرم و سرعت 2.4 متر بر ثانیه، سازه بطور دقیق مورد بررسی قرار گرفت. ناحیه شماره 2 در شکل 11 که محل برخورد جسم ضربه‌زننده می‌باشد، دچار آسیب گردید. در نواحی شماره 1 و 3، ریب‌های مارپیچ دچار آسیب شدند. همچنین ریب‌های محیطی نشان داده شده در شکل 11 نیز در هشت نقطه، دچار آسیب شدند. بررسی‌های دقیق سازه نشان دادند که آسیب‌های ریب‌های محیطی، بسیار جدی‌تر می‌باشند. همچنین تقریباً تمامی نواحی آسیب دیده سازه، نسبت به محل اصابت ضربه، متقارن می‌باشند. در شکل 11، نواحی آسیب دیده از سازه، ناشی از اعمال ضربه جانبی با انرژی 28.8 ژول، ارائه شده است.

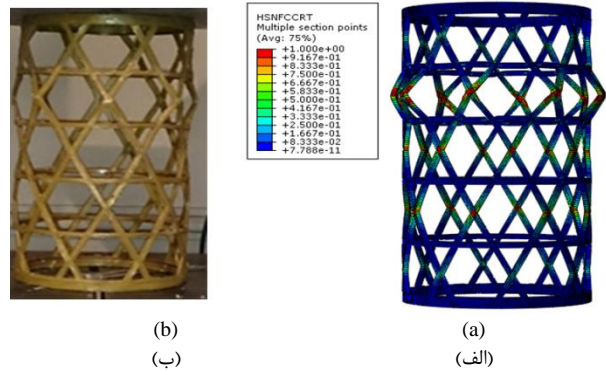


Fig. 8 (a) Simulation of structures in ABAQUS software. (b) Experimental testing of structures

شکل 8 الف) شبیه‌سازی سازه در نرم‌افزار. ب) تست تجربی سازه

در شکل 9 نمودارهای نیرو-جابجایی سازه در شبیه‌سازی المان محدود (با در نظر گرفتن آسیب) و تست تجربی نشان داده شده‌اند. با توجه به نمودارها، حداکثر قابلیت تحمل بار محوری فشاری سازه در شبیه‌سازی المان محدود، 9 درصد بیشتر از تست تجربی می‌باشد.

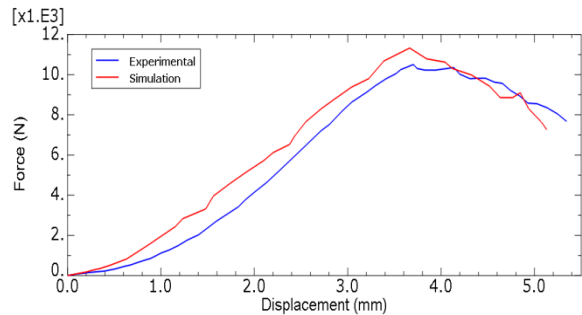


Fig. 9 Diagram of Force-Displacement of structure (before applying lateral impact)

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی سازه (قبل از بار اعمال ضربه عرضی)

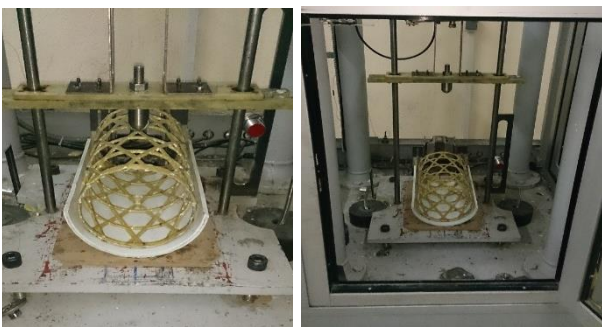


Fig. 10 Low-velocity impact test boundary conditions

شکل 10 شرایط مرزی تست ضربه سرعت پایین

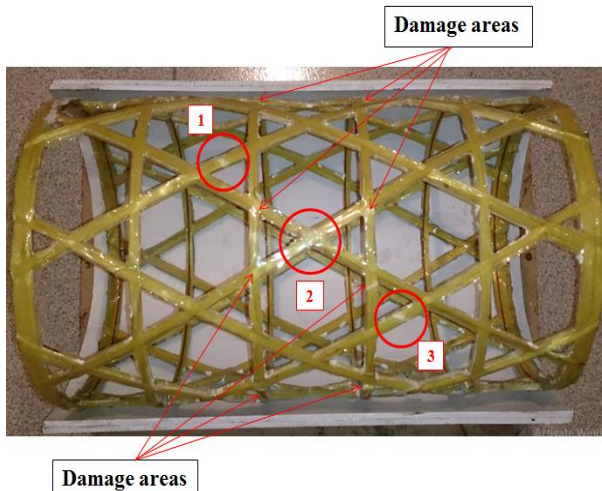


Fig. 11 Damage areas in transvers impact test with energy of 28.8 J

شکل 11 نواحی آسیب در تست ضربه عرضی با انرژی 28.8 ژول

2-3- بررسی نتایج تست تجربی و شبیه‌سازی المان محدود سازه تحت ضربه عرضی

پس از ساخت نمونه‌ها، با قرارگیری نمونه در داخل دستگاه و تنظیم کردن دستگاه، با ارسال فرمان، جسم ضربه‌زننده از موقعیت خود رها شده و به محل مورد نظر سازه (تلاقی دو ریب مارپیچ در وسط سازه)، اصابت می‌کند. همزمان با برخورد جسم ضربه‌زننده به سازه، شتاب‌سنج متصل به جسم ضربه‌زننده، شتاب‌های وارده به آن را ثبت می‌کند و رایانه متصل به دستگاه، نمودار شتاب-زمان جسم ضربه‌زننده را رسم می‌کند. با ضرب جرم ضربه‌زننده، در مقادیر شتاب‌های بدست آمده، نمودار نیرو-زمان سازه بدست آمده است. شرایط مرزی تست ضربه سقوط آزاد، شبیه شرایط مرزی مقاله مرجع [17] در نظر گرفته شده است، به طوری که یک جسم صلب گهواره‌ای (نیم استوانه) شکل، در زیر نمونه قرار داده شد و سپس نمونه در داخل آن، قرار گرفته است. در شکل 10، شرایط مرزی تست ضربه سرعت پایین نمایش داده شده است.

دستگاه مورد استفاده در این آزمون، محدودیت‌هایی از جمله توان داده برداری تا 26 میلی‌ثانیه و ثبت شتاب‌هایی کمتر از 1000 متر بر مجذور ثانیه را دارا می‌باشد. پس از انجام تست، نمونه، مورد بازبینی چشمی قرار گرفته، به جز یک تغییر رنگ بسیار کم در محل برخورد جسم ضربه‌زننده به نمونه، آسیب دیگری قابل مشاهده نبود. از آنجایی که در این پژوهش، هدف اصلی،

3-3- نتایج شبیه‌سازی المان محدود سازه در بارگذاری ضربه سقوط آزاد در این بخش، در ابتدا به اعتبار سنجی روش مدل سازی سازه استوانه‌ای کامپوزیتی تحت بار ضربه عرضی با تحقیقات معتبر گذشته پرداخته شده است. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی المان محدود سازه تحقیق حاضر، بررسی و با نتایج تست تجربی، مقایسه شده‌اند.

الف) برخورد جسم ضربه‌زننده 2.27 کیلوگرمی به سازه با سرعت 1.5 متر بر ثانیه

به طور کلی در بررسی پاسخ ضربه، دو پارامتر زمان برخورد و حداکثر نیروی تماس ناشی از ضربه، حائز اهمیت می‌باشند. در شکل 14، مقایسه تاریخچه نیروی ضربه، بدون در نظر گرفتن اثر آسیب پیش‌رونده، با حالت واقعی یعنی با در نظر گرفتن اثر این آسیب، نشان داده شده است. با شروع مکانیزم آسیب، سفتی سازه کاهش می‌یابد و موجب کاهش حداکثر نیروی تماس و افزایش زمان برخورد می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود، بین زمان برخورد و حداکثر نیروی تماس در مدل المان محدود، با نتیجه تست تجربی مطابقت خوبی وجود دارد. همچنین در شکل 15 نمودارهای انرژی داخلی و انرژی جنبشی بر حسب زمان سازه، برای حالتی که سرعت جسم ضربه‌زننده در لحظه برخورد به سازه، برابر 1.5 متر بر ثانیه بوده است، ارائه شده است. با توجه به این نمودار، انرژی جنبشی از 2.55 ژول که معادل با ارتفاع رها شدن ضربه‌زننده می‌باشد، تا مقدار صفر، در لحظه‌ای که بیشترین آسیب به سازه زده شده است، کاهش می‌یابد و سپس انرژی جنبشی ضربه‌زننده تا 1.74 ژول افزایش می‌یابد. در حین برخورد گلوله ضربه‌زننده با سازه، بخشی از این انرژی اولیه، با آسیب زدن سازه و انتشار امواج الاستیک در آن، ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در این برخورد، بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی، 0.81 ژول می‌باشد که معادل 31٪ از انرژی اولیه ضربه‌زننده می‌باشد.

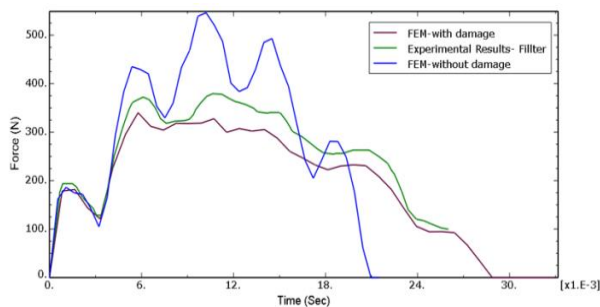


Fig. 14 Force-time diagram of the striking object, $m = 2.27 \text{ kg}$ and $v = 1.5 \text{ m/s}$

شکل 14 نمودار نیرو-زمان جسم ضربه‌زننده، $m=2.27 \text{ kg}$ و $v=1.5 \text{ m/s}$

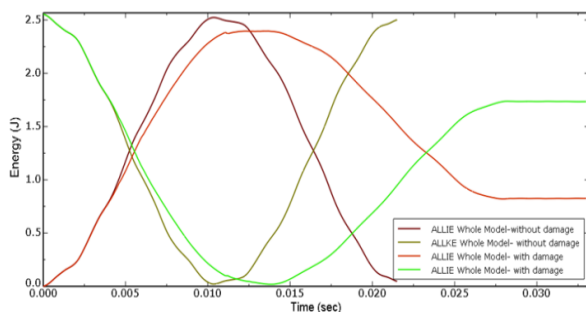


Fig. 15 Internal / kinetic energy time diagram of-structure, $m=2.27 \text{ kg}$ and $v=1.5 \text{ m/s}$

شکل 15 نمودار انرژی داخلی/جنبشی-زمان سازه، $m=2.27 \text{ kg}$ و $v=1.5 \text{ m/s}$

3-3-3- اعتبارسنجی روش مدلسازی عددی ضربه عرضی بر روی استوانه کامپوزیتی با تحقیقات گذشته

جهت حصول اطمینان از نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر، در این بخش، به مقایسه نتایج تحلیل ضربه عرضی سرعت پایین روی استوانه کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی با نتایج تجربی و عددی مرجع [17] پرداخته شده است. در این مطالعه، ضربه‌زننده، عبارت است از یک کره به قطر 12.7 میلی‌متر و جرم 5.34 کیلوگرم که با سرعت 1.94 متر بر ثانیه (معادل انرژی برخورد 10 ژول) به سازه برخورد می‌کند. همچنین سازه مورد تحقیق، استوانه‌ای کامپوزیتی به قطر داخلی 55 میلی‌متر و ضخامت 6.5 میلی‌متر و طول 110 میلی‌متر و با آرایش الیاف به صورت $10_{\pm 55}$ می‌باشد. برای مشبندی سازه، از المان‌های پوسته‌ای S4R استفاده شده است. در شکل‌های 12 و 13، به ترتیب، مدل شبیه‌سازی شده استوانه کامپوزیتی تحت ضربه عرضی در تحقیق حاضر ایجاد شده و نمودار نیرو-زمان سازه در مقایسه با نتایج تست تجربی مرجع [17] نمایش داده شده‌اند.

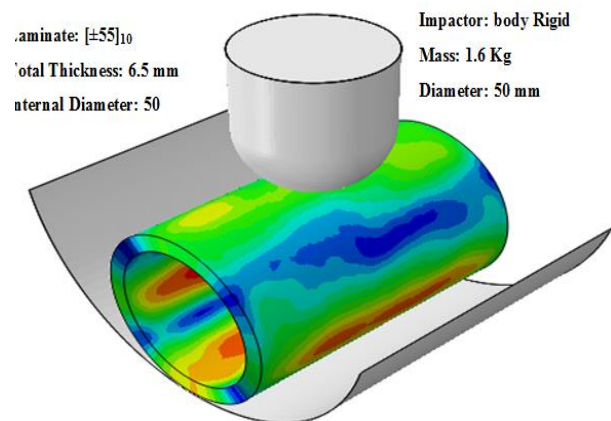


Fig. 12 Finite element simulation of a composite cylindrical structure under transverse impact

شکل 12 شبیه‌سازی المان محدود سازه استوانه‌ای کامپوزیتی تحت ضربه عرضی

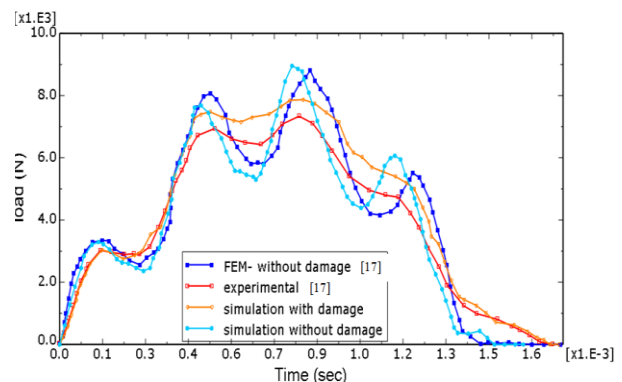


Fig. 13 Comparison of transverse impact response results for composite cylinder

شکل 13 مقایسه نتایج پاسخ ضربه عرضی برای سازه استوانه کامپوزیتی

3-4-1 نتایج تست تجربی حاضر سازه در بارگذاری محوری فشاری بعد از اعمال ضربه عرضی

بر طبق نمودار نیرو-زمان جابجایی تست تجربی، مقدار نیروی بحرانی کمانش (جایی که نمودار نیرو-جابجایی افت ناگهانی کرده است) برابر 9962 نیوتن می‌باشد. شایان ذکر است این تست، بر روی نمونه‌ای که قبلاً مورد تست ضربه جانبی قرار گرفته است، انجام شده است. در شکل 19، نمایی از سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی، بعد از اعمال ضربه جانبی و بعد از شکست تحت بار محوری فشاری، ارائه شده است. ناحیه شماره 2، محل برخورد جسم ضربه‌زننده می‌باشد که هنگام تست محوری فشاری، به جهت آسیبی که از تست ضربه عرضی متوجه آن شده بود، به سمت بیرون صفحه، تغییر شکل یافته است. همچنین، ناحیه‌های شماره 1 و 3 نیز که در تست ضربه آسیب دیده بودند، دچار تغییر شکل و شکست مشهود، به سمت داخل سازه شده‌اند. نکته قابل تأمل این است که ریب‌های محیطی، علی‌رغم آسیب دیدگی بیشتر نسبت به ریب‌های ماریچ در تست ضربه عرضی، در این تست، دچار تغییر شکل و شکست نشده‌اند. ولی ریب‌های ماریچ، بدلیل اینکه مولفه نیرویی بسیار بیشتری در راستای آن‌ها می‌افتد، دچار شکست شده‌اند.

3-4-2 نتایج شبیه‌سازی المان محدود سازه، در بارگذاری محوری فشاری، بعد از اعمال ضربه جانبی

شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، در دو گام پی در پی انجام شده است. در گام اول، جسم ضربه‌زننده به جرم 10 کیلوگرم، با سرعتی معادل 2.4 متر بر ثانیه، به سازه ضربه‌ای عرضی اعمال کرده است. سپس در گام دوم، تحلیل غیرخطی کمانش سازه آغاز شده است. به طوری که سازه آسیب دیده در گام اول، در گام دوم با در نظر گرفتن آسیب ناشی از ضربه گام اول، مورد تحلیل بار محوری فشاری قرار گرفته است.

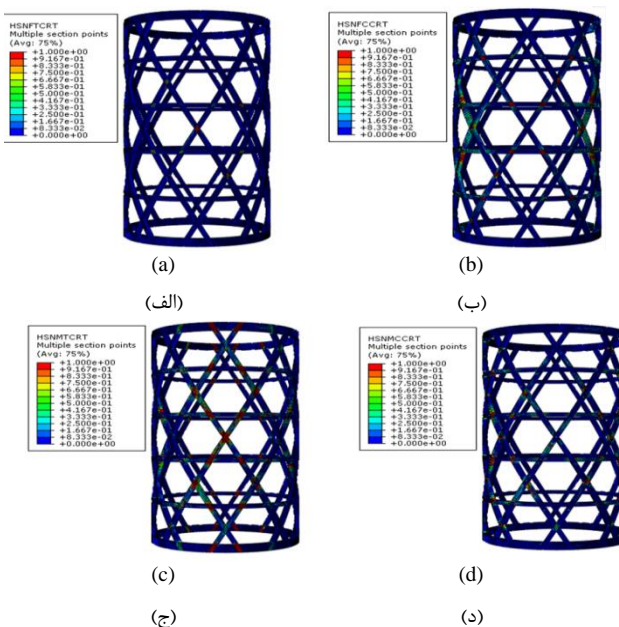


Fig. 18 Structural damage modes ($m = 10 \text{ kg}$ and $v = 2.4 \text{ m/s}$) (a) Fiber damage in tension, (b) Fiber damage in compression, (c) Resin damage in tension, (d) Resin damage in compression

شکل 18 موده‌های آسیب سازه ($m=10 \text{ kg}$ و $v=2.4 \text{ m/s}$) (الف) آسیب الیاف در کشش، (ب) آسیب الیاف در فشار، (ج) آسیب رزین در کشش، (د) آسیب رزین در فشار

ب) برخورد جسم ضربه‌زننده 10 کیلوگرمی به سازه با سرعت 2.4 متر بر ثانیه

در شکل 16 و 17 نمودار نیرو-زمان و انرژی داخلی و انرژی جنبشی بر حسب زمان سازه، برای حالتی که سرعت جسم ضربه‌زننده در لحظه برخورد به سازه، برابر 2.4 متر بر ثانیه بوده است، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی جسم ضربه‌زننده، سازه دچار آسیب می‌گردد و در نتیجه آن، کاهش سفتی سازه سبب کاهش 50 درصدی نیروی تماس و افزایش 75 درصدی زمان تماس می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، نمودار حاصل از شبیه‌سازی، به نمودار حاصل از تست تجربی نزدیک است.

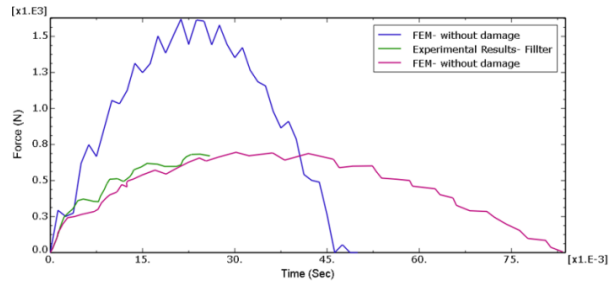


Fig. 16 Structure force-time diagram, $m=10 \text{ kg}$ and $v=2.4 \text{ m/s}$

شکل 16 نمودار نیرو-زمان سازه. $v=2.4 \text{ m/s}$ و $m=10 \text{ kg}$

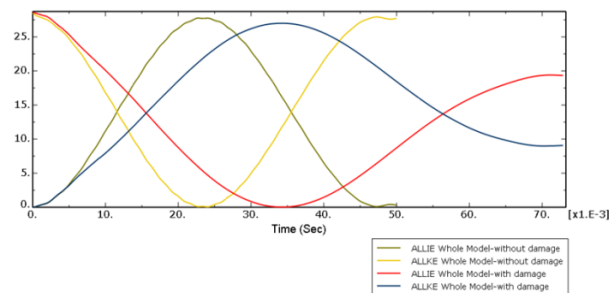


Fig. 17 Internal / kinetic energy time diagram of structure, $m=10 \text{ kg}$ and $v=2.4 \text{ m/s}$

شکل 17 نمودار انرژی داخلی/جنبشی-زمان سازه. $v=2.4 \text{ m/s}$ و $m=10 \text{ kg}$

با توجه به اینکه دستگاه تست ضربه توانایی ثبت اطلاعات فقط تا 26 میلی‌ثانیه را دارد، به همین خاطر بعد از این زمان، نیروی ضربه‌زننده‌گیرنده نشده است. همچنین با توجه به نمودارهای انرژی درونی و جنبشی سازه، می‌توان نتیجه گرفت که 9.3 ژول از انرژی که معادل 32 درصد انرژی اولیه جسم ضربه‌زننده می‌باشد، جذب و صرف آسیب زدن به سازه شده است. در شکل 18، موده‌های آسیب سازه، به تفکیک ارائه شده است. بیشترین آسیب‌های جدی سازه، در موده‌های فشاری الیاف و به صورت متقارن در سازه اتفاق افتاده است (شکل 18 قسمت ب).

3-4-4 تأثیر ضربه عرضی و آسیب ناشی از آن، بر حداکثر استحکام و رفتار کمانشی سازه

به منظور بررسی اثر ضربه عرضی بر حداکثر استحکام کمانشی سازه، در ابتدا سازه مورد نظر تحت ضربه عرضی به انرژی 28.8 ژول (جرم جسم ضربه‌زننده برابر 10 کیلوگرم و سرعت آن برابر 2.4 متر بر ثانیه) قرار گرفته است. که این ضربه، سبب آسیب به قسمت‌های مختلف سازه گردید. سپس سازه مذکور، تحت تست محوری فشاری قرار گرفته است.

شده‌اند. با توجه به نتایج تست تجربی در جدول فوق، حدود 5.2% از استحکام کمانشی سازه، بعد از اعمال ضربه عرضی به آن، کاسته شده است. نتایج گویای این است که این ضربه، اگرچه آسیب قابل ملاحظه‌ای به سازه وارد کرده است، ولی تأثیر محسوس‌تری بر استحکام کمانشی سازه نگذاشته است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی المان محدود سازه، گویای این مهم می‌باشد. به طوری که با توجه به این نتایج، 7.5% از استحکام کمانشی سازه، بعد از اعمال ضربه جانبی به آن، کاسته شده است. این امر، نشان دهنده تحمل به خسارت بالای سازه ساخته شده از کامپوزیت کولار/اپوکسی می‌باشد.

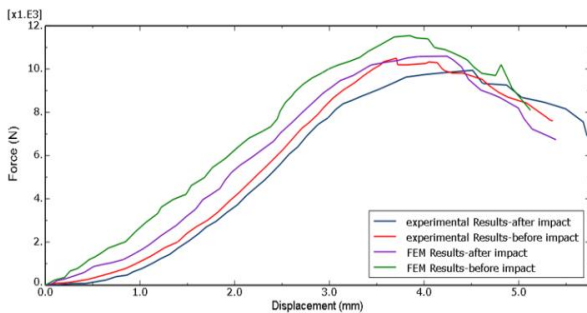


Fig. 21 Experimental testing of structures in compressive axial loading

شکل 21 تست تجربی سازه در بارگذاری محوری فشاری

جدول 3 مقایسه نتایج تست تجربی سازه در بارگذاری محوری فشاری، قبل و بعد از ضربه جانبی

Table 3 Comparison of experimental structural test results in axial compressive loading, before and after lateral impact

تست تجربی (نیوتن)	شبیه‌سازی المان محدود (نیوتن)
10505	بار بحرانی کمانش (شکست) قبل از تست
-----	ضربه عرضی
-----	درصد خطا + 9.06%
9962	بار بحرانی کمانش (شکست) پس از تست
-----	ضربه عرضی
-----	درصد خطا + 6.36%

4- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش، تأثیر آسیب ناشی از ضربه جانبی، بر استحکام کمانشی سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی، تحت نیروی محوری فشاری بوده است. پس از تست ضربه و کمانش (قبل و بعد از اعمال ضربه) روی سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی ساخته شده از کامپوزیت کولار/اپوکسی، مشاهده شد که 5.2 درصد (به روش تجربی) و 7.5 درصد (به روش المان محدود) از استحکام کمانشی سازه پس از اعمال ضربه جانبی، کاسته شد. همچنین از نتایج مهم دیگر این پژوهش، می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

1- در بعضی مواقع، سازه‌های مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری دچار شکست می‌شوند و لزوماً کمانش نمی‌کنند.

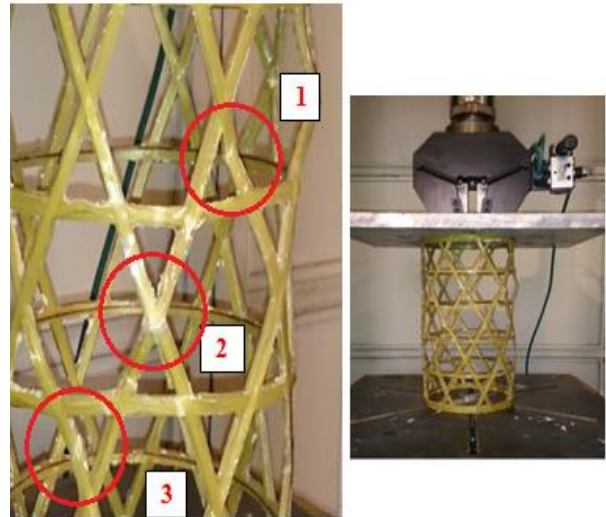


Fig. 19 Failure of the structural under axial compressive load after applying lateral impact

شکل 19 شکست سازه تحت بار محوری فشاری سازه، بعد از اعمال ضربه جانبی

در شکل 20، نمایی از سازه شبیه‌سازی شده به همراه مود شکست آن (مود شکست فشاری الیاف) ارائه شده است. در ادامه، به مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی سازه در بارگذاری محوری فشاری، قبل و بعد از اعمال ضربه جانبی پرداخته شده است.

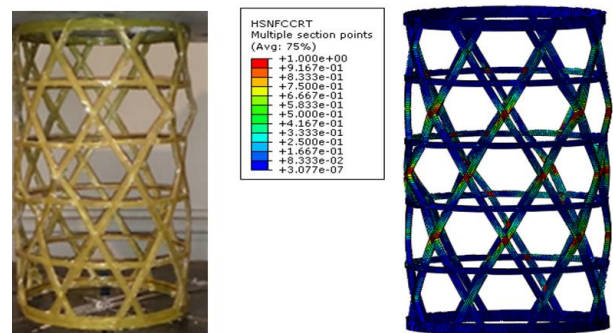


Fig. 20 Simulation of the structure under axial compressive load in ABAQUS software considering damage (after lateral impact)

شکل 20 شبیه‌سازی سازه در نرم‌افزار آباکوس با در نظر گرفته آسیب (بعد از اعمال ضربه جانبی)

3-5- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی سازه در بارگذاری محوری فشاری، قبل و بعد از اعمال ضربه جانبی

در شکل 21، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تست بارگذاری محوری فشاری برای هر دو نمونه قبل و بعد از اعمال ضربه، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، روند تمامی نمودارها، بسیار شبیه به هم می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی المان محدود، اگرچه از دقت قابل قبولی برخوردار است، ولی از نظر کمی، از مقادیر تست تجربی، اندکی بیشتر می‌باشد. نکته قابل تأمل در شکل 21، این است که آسیب ناشی از ضربه، سبب جابجایی بیشتر سازه در تست فشاری محوری، تا رسیدن سازه به کمانش می‌شود. این مهم، هم در نتایج تست تجربی و هم در نتایج شبیه‌سازی عددی، مشهود است. در جدول 3، نتایج حاصل از تست تجربی و شبیه‌سازی المان محدود با یکدیگر مقایسه

- Composite Cylindrical Shells Under Lateral Compression," *Composite Structures*, 152, 626-636, 2016.
- [13] David West, O. S., Nash, D. H. and Banks, M. W. "Low-Velocity Heavy Mass Impact Response of Singly Curved Composites," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 228(1), 17-33, 2014.
- [14] Mohammadi, Y., Qasemi H. and Asadi, M., "On the Behavior of Carbon and Kevlar Fibers in Cylindrical Composites Subjected to Low-velocity Impact: Experimental Observation and Numerical Analysis," In Persian, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(5), 1025-1040, 2019.
- [15] Azarafza, R., Golkar, A.H. and Davar, A., "Analytical Investigation of Low-Velocity Oblique Impact on Composite Cylindrical Shells," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, 7(3), 1106-1119, 2020.
- [16] Davar, A., Azarafza, R. and Faraji Shooa, J., "Experimental and Numerical Analysis of Low-Velocity Impact on Composite Sandwich Panels with Grid Stiffened Core," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, 6(4), 615-626, 2020.
- [17] Tarfaoui, M., Gning, P. B. and Hamitouche, L., "Dynamic Response and Damage Modeling of Glass/Epoxy Tubular Structures: Numerical Investigation," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(1), 1-12, 2008.
- [18] Lopes, C., Camanho, P., Gürdal, Z., Maimí, P. and González, E., "Low-velocity Impact Damage on Dispersed Stacking Sequence Laminates. Part II: Numerical simulations," *Composites Science and Technology*, 69, 937-947, 2009.

2- الیاف کولار، از استحکام فشاری پایینی برخوردار می‌باشند و استفاده از این الیاف در ساخت سازه‌های مشبکی که صرفاً تحت بار محوری فشاری قرار دارند، توصیه نمی‌شود.

3- الیاف کولار، اگرچه استحکام فشاری پایینی دارند، ولی جذب انرژی این الیاف، بسیار بالا می‌باشد. به طوری که در این پژوهش نشان داده شد، سازه تقریباً 32% از انرژی ضربه‌زننده را جذب کرده است.

4- شکست الیاف کولار بر خلاف الیاف شیشه و کربن، ترد نمی‌باشد.

5- در نظر گرفتن آسیب در شبیه‌سازی عددی، سبب افزایش مدت زمان برخورد جسم ضربه‌زننده به سازه و کاهش نیروی وارده شده به آن می‌شود.

6- به طور کلی در پدیده ضربه، مقداری از انرژی جسم ضربه‌زننده صرف انتشار امواج الاستیک در سازه می‌شود و پس از آن، در صورت امکان، انرژی باقی مانده صرف آسیب زدن به سازه می‌شود.

7- شکست سازه مشبک (کولار/اپوکسی) از محل گره‌ها در بارگذاری محوری فشاری رخ می‌دهد و بدلیل ساختار شبکه‌ای سازه، ترک‌های ریز ایجاد شده در محل گره‌ها، به راحتی به قسمت‌های دیگر انتشار پیدا نمی‌کنند.

8- با توجه به مقایسه و اعتبار سنجی‌های انجام شده، می‌توان گفت در این پژوهش، روشی قابل اعتماد برای پیشگویی پاسخ ضربه و کمانش سازه‌های مشبک به روش المان محدود معرفی شده که یکی از ویژگی‌های مهم این روش، صرفه جویی در زمان و هزینه می‌باشد.

5-مراجع

- [1] Totaro, G. and Gürdal, Z., "Optimal Design of Composite Lattice Shell Structures for Aerospace Applications," *Aerospace Science and Technology*, 13(4-5), 157-164, 2009.
- [2] Morozov, E., V., Lopatin, A., V. and Nesterov, V., A., "Finite-Element Modelling and Buckling Analysis of Anisogrid Composite Lattice Cylindricalshells," *Composite Structures*, 93(2), 308-323, 2011.
- [3] Cantwell, W. and Morton, J., "Impact Perforation of Carbon Fibre Reinforced Plastic," *Composites science and technology*, 38(2), 119-141, 1990.
- [4] Davar, A., Azarafza R. and Bagheri, V., "Experimental and Numerical Analysis of Composite Lattice Truncated Conical Structures with and Without Carbon Nanotube Reinforcements Under axial Compressive Force," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, 4(4), 418-425, 2018.
- [5] Pernas-Sánchez, J., et al., "Numerical Analysis of High Velocity Impacts on Unidirectional Laminates," *Composite Structures*, 107, 629-634, 2014.
- [6] Hall, I. and Guden, M., "High Strain Rate Testing of a Unidirectionally Reinforced Graphite Epoxy Composite," *Periodical High strain rate testing of a unidirectionally reinforced graphite epoxy composite*, 2001. 20, 897-899.
- [7] Sankar, B., V. and Sun, C., "Low-velocity Impact Response of Laminated Beams Subjected to Initialstresses," *AIAA Journal*, 23, 1962-1969, 1985.
- [8] Kim, C. G. and Jun, E. J., "Impact Resistance of Composite Laminated Sandwich Plates," *Journal of Composite Materials*, 26(15), 2247-2261, 1992.
- [9] Lee, L., et al., "Dynamic Responses of Composite Sandwich Plate Subjected to Low Velocity Impact," *Composites*, 1991.
- [10] Wu, E. and Shyu, K., "Response of Composite Laminates to Contact Loads and Relationship to Low-Velocity Impact," *Journal of composite materials*, 27(15), 1443-1464, 1993
- [11] Zamani, M., Khalili, S. "The Effect of External Skin on Buckling Strength of Composite Lattice Cylinders Based on Numerical and Experimental Analysis". *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 3(2), 83-87, 2016.
- [12] Moeinifard, M., Liaghat, G., Rahimi, G., Talezadehlari, A. and Hadavinia, H., "Experimental Investigation on the Energy Absorption and Contact Force of Unstiffened and Grid-Stiffened