



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



تحلیل تجربی و عددی استحکام باقی مانده استوانه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری متوالی

احمد گرامی¹، علی داور^{2*}، جعفر اسکندری جم³

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

2- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

3- استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

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

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این تحقیق، رفتار استحکام اولیه سازه استوانه مشبک کامپوزیتی تحت نیروی محوری فشاری در بارگذاری مرتبه اول و استحکام باقی مانده آن در بارگذاری مرتبه دوم، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، در روش تجربی، ابتدا سازه استوانه‌ای مشبک، با الگوی شبکه شش ضلعی، با استفاده از قالب سیلیکونی و دستگاه رشته پیچی، ساخته شده است. در آزمون بارگذاری تجربی مرتبه اول، سازه تحت نیروی محوری فشاری قرار گرفته و استحکام اولیه آن در آستانه فروریزش (اولین آسیب)، بدست آمده است. سپس، به منظور مطالعه استحکام باقی مانده، سازه آسیب دیده است. پس از باربرداری کامل و بازگشت به طول اولیه، تحت بارگذاری مرتبه دوم قرار گرفته است. اعتبارسنجی نتایج نیرو-جابجایی حاصل از نرم افزار المان محدود آباکوس با مقایسه با نتایج آزمون‌های بارگذاری تجربی صورت گرفته است. در ادامه، تحلیل عددی اثر انواع الگوهای شبکه لوزی و مثلثی بر استحکام اولیه و استحکام باقی مانده سازه انجام پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین نسبت نیروی تحمل شده به وزن (استحکام ویژه) در آستانه فروریزش سازه، به ترتیب مربوط به الگوهای شبکه مثلثی، شش ضلعی و لوزی در بارگذاری مرتبه اول و الگوهای شبکه شش ضلعی، مثلثی و لوزی در بارگذاری مرتبه دوم است. به طوری که در مرتبه دوم بارگذاری، الگوهای شبکه شش ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب 80.5، 69.11 و 54.01 درصد از استحکام اولیه خود را حفظ کرده‌اند. همچنین، الگوهای شبکه شش ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب از بیشترین انرژی جذب شده ویژه تا آستانه فروریزش برخوردارند.

دریافت: 1400/02/30

پذیرش: 1400/09/16

کلیدواژگان

استحکام باقی مانده، استوانه مشبک کامپوزیتی، بارگذاری محوری فشاری متوالی، روش المان محدود، روش تجربی.

Experimental and Numerical Study of Residual Strength of Composite Grid Stiffened Cylindrical Shells Under Sequential Compressive Axial Load

Ahmad Gerami¹, Ali Davar^{2*}, Jafar Eskandari Jam³

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

2- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

3- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran

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

Keywords

Residual strength, Composite grid stiffened cylindrical shells, Sequential compressive axial load, Finite element method, Experimental method.

Abstract

In this research, the behavior of the initial strength of a composite lattice cylinder structure under axial compressive force in the first loading and its residual strength in the second loading stages have been studied. For this purpose, in the experimental method, first, the composite cylindrical structure, with a hexagonal lattice pattern, is made using a silicone mold and filament winding process. In the first experimental loading test, the structure is subjected to axial compressive force and its initial strength at the beginning of collapse (first damage) is obtained. Then, in order to study the residual strength, the damaged structure is subjected to the second loading stage after complete unloading and recovers its initial length. Validation of force-displacement results obtained from ABAQUS finite element software has been performed in comparison with the results of experimental loading tests. Next, the numerical analysis of the effect of various rhombic and triangular lattice patterns on the initial strength and residual strength of the structure is performed. The results show that the highest ratio of bearing force to weight on the collapse threshold of the structure in first loading stage is related to the triangular, hexagonal and rhombic, lattice patterns and hexagonal, triangular and rhombic lattice patterns, respectively in the second loading stage. After the second loading stage, hexagonal, triangular and rhombic lattice patterns retained 80.5%, 69.11% and 54.01% of their original strength, respectively. Also, hexagonal, triangular and rhombic lattice patterns have the highest specific absorbed energy up to the collapse threshold, respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Gerami, A., Davar, A., Eskandari Jam, J., "Experimental and Numerical Study of Residual Strength of Composite Grid Stiffened Cylindrical Shells Under Sequential Compressive Axial Load", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1503-1513, 2021.

http://doi.org/10.22068/JSTC.2021.529821.1726

1- مقدمه

در چند دهه اخیر استفاده از مواد کامپوزیتی در طراحی سازه‌های پیشرفته، با توجه به اهمیت توأمان کاهش وزن و افزایش استحکام سازه‌ها، پیشرفت چشمگیری داشته است. امروزه رقابت بر سر بهینه‌سازی سازه‌ها می‌باشد به نحوی که بتوان بیشترین بهره را از خواص (مکانیکی، فیزیکی و ...) مواد کامپوزیتی برد. در این بین روش‌های نوین طراحی مهندسی از ویژگی‌های مواد مرکب بهره جسته و ساختارهای هدفمند را به وجود آورده‌اند. ساختارهای مشبک به عنوان یک ساختار هدفمند، از قرارگیری ریب‌های کامپوزیتی متصل به یکدیگر که تشکیل یک مجموعه پیوسته به صورت دو بعدی (صفحه‌ای) یا سه بعدی (فضایی) می‌دهند، تشکیل می‌شوند. دامنه مقاومت سازه‌های مشبک کامپوزیتی در برابر انواع آسیب‌ها بسیار وسیع می‌باشد. با توجه به تک راستا بودن الیاف در ریب‌ها بروز پدیده‌هایی همچون تورق بسیار کاهش می‌یابد. همچنین وجود شبکه‌ای از تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی در ساختار، سبب تغییر مسیر بارهای تخریبی در اطراف نقاط آسیب محلی شده و در نتیجه، این امر سبب افزایش تحمل این سازه‌ها می‌شود [1]. در تحقیقات جامع و کاربردی وسیلیو و همکارانش، یک فرآیند کامل از طراحی، ساخت و آزمون ساختارهای مشبک ارائه شده است. آنان در این تحقیقات، رفتار کمانشی استوانه‌های مشبک کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند و دریافته‌اند، سازه‌های استوانه‌ای مشبک دارای ویژگی خودپایداری¹ می‌باشند. به طوری که در شرایطی که این سازه‌ها تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرند، ریب‌های مارپیچی فشار را در ریب‌های محیطی یا پوسته تبدیل به کشش کرده و بدین ترتیب بار فشاری، مشابه با یک نیروی فشاری داخلی عمل می‌کند. این فشار شکل استوانه‌ای سازه را تثبیت کرده و حساسیت پوسته را به عیوب شکلی کاهش و مقدار بار بحرانی را افزایش می‌دهد. همچنین راندمان وزنی این سازه‌ها به مراتب بیشتر از سازه‌های مشابه با تقویت‌کننده‌های غیر کامپوزیتی است [1-3]. تواترو و گوردال با استفاده از روش عددی به مطالعه بهینه‌سازی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری محوری فشاری بر مبنای پارامترهای مؤثری نظیر عرض سطح مقطع ریب‌های مارپیچ و محیطی و فاصله ریب‌ها پرداختند و نقاط طراحی مناسب را تعیین نمودند [4]. موروزوف و همکارانش مطالعات گسترده‌ای را 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 تیر² 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 [5]. یزدانی و رحیمی در تحقیقاتی جداگانه به مطالعه پارامتری بر روی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی پرداختند و تأثیر چگالی و شکل تقویت‌کننده‌ها را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که بار کمانشی بحرانی برای پوسته‌هایی با شبکه مثلثی و شش‌ضلعی، به مراتب بیشتر از بار کمانشی بحرانی برای پوسته‌های تقویت نشده و پوسته‌های تقویت شده با شبکه لوزی می‌باشد. همچنین آن‌ها دریافته‌اند که در بارگذاری محوری فشاری، افزودن تعداد ریب‌های مارپیچ مفیدتر از افزودن ریب‌های حلقوی است. علاوه بر این، آنان این سازه‌ها را تحت بارگذاری نوسانی قرار دارند و بهترین شکل تقویت‌کننده‌ها را پیشنهاد کردند و به این نتیجه رسیدند که تحت بار نوسانی، پوسته‌های مشبک، رفتاری به مراتب بهتر از پوسته‌های بدون

تقویت‌کننده دارند [6, 7]. لای و همکاران مطالعه عددی رفتار کمانشی (استحکام کمانشی و شکل مود کمانش) استوانه‌های مشبک کامپوزیتی با شش الگوی شبکه شامل لوزی، مثلثی، شش‌ضلعی، مثلثی دوران یافته، مثلثی ترکیب شده و مستطیلی تحت بارهای محوری فشاری، خمش خالص، پیچش و خمش عرضی را انجام داده‌اند. نتایج نشان داد الگوی مثلثی و مثلثی دوران یافته در برابر بار محوری فشاری و خمش خالص، از نظر بار کمانش ویژه، کارآمدتر هستند در حالی که در بارگذاری پیچشی و خمشی عرضی الگوی شش‌ضلعی کارآمدتر است [8]. مینگفان و همکارانش به مطالعه رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی به سه روش سفتی معادل، المان محدود و روش ترکیبی حاصل از ترکیب روش سفتی معادل و المان محدود پرداختند. آنان همچنین اثر نقص مواد را در تحلیل المان محدود به صورت مستقل بررسی کردند. مقایسه نتایج آزمون تجربی با سه روش مذکور نشان دادند که روش المان محدود از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد [9]. طالعزاده و رحیمی اثر نقص هندسی بر کمانش پوسته‌های ساده و مشبک کامپوزیتی با و بدون گشودگی را به روش تجربی و عددی مورد مطالعه قراردادند. نتایج نشان دادند که میزان اثرگذاری نقص هندسی بر بار بحرانی پوسته مشبک، کمتر از پوسته‌های ساده است [10]. فدویان و همکارانش به منظور دستیابی به حداکثر بار قابل تحمل در بارگذاری محوری فشاری برای یک سازه‌ی استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی به مطالعه فاکتورهای ساختی در فرآیند رشته‌پیچی پرداختند. آنان اثر چهار فاکتور ساخت کشش الیاف، سرعت پیچش، شرایط پخت و نوع الیاف بر کیفیت ساخت و استحکام استوانه‌های مشبک کامپوزیتی را بررسی کردند. با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی، اثر فاکتورهای ساخت مذکور در سه سطح و بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها (به صورت مجزا) بر متغیر پاسخ، مورد بررسی قرار گرفته است. فاکتورهای نوع الیاف و کشش الیاف به ترتیب بیشترین تأثیر را بر روی متغیر پاسخ حداکثر بار تحمل شده ویژه داشته‌اند. فاکتورهای نوع الیاف، کشش الیاف و سرعت پیچش، به ترتیب تأثیرگذارترین عوامل بر روی متغیر پاسخ کارائی فشاری بوده‌اند [11]. داور و همکارانش به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی به مطالعه رفتار کمانشی سازه مخروط ناقص مشبک کامپوزیتی با و بدون نانولوله کربنی به عنوان تقویت‌کننده، پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن 2٪ وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی در حین ساخت، نیروی قابل تحمل بیشینه را حدود 44٪ افزایش می‌دهد. این در حالی است که با افزایش کسر حجمی نانولوله بالاتر از 2٪ وزنی، به دلیل کاهش کیفیت پراکندگی و کلوخه‌ای شدن حداکثر نیروی قابل تحمل سازه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تجربی با نتایج مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مطابقت خوبی داشت [12]. خلیلی و همکارانش به روش تجربی و عددی به مطالعه نیم استوانه مشبک کامپوزیتی با شبکه لوزی تحت بار محوری فشاری پرداختند. همچنین در ادامه، اثر ضخامت پوسته، زاویه لایه-های پوسته، ارتفاع ریب و نوع شبکه مشبک را بررسی کردند. نتایج مطالعه آنان نشان داد نمونه با الگوی مثلثی قابلیت تحمل بار بیشتری دارد. و با افزایش ضخامت پوسته و ارتفاع ریب، قابلیت باربری سازه افزایش می‌یابد [13]. شاهقلیان و رحیمی به روش عددی و تحلیلی رفتار کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی را با استفاده از آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی مورد مطالعه قرار دادند [14]. رستمی و شهرجردی با استفاده از معادلات حاکم بر ساختارهای مشبک استوانه‌ای بر اساس میدان جابجایی و روابط تنش و کرنش به مطالعه کمانش استوانه مشبک کامپوزیتی با پوسته درونی و بیرونی

3- فرآیند ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

برای ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی، چندین روش از جمله استفاده از قالب سیلیکونی، قالب ماشینکاری شده فلزی یا پلی‌اتیلنی و روش شکل‌دهی آزاد الیاف وجود دارد [1-3]. در این پژوهش برای ساخت نمونه، از روش رشته پیچی درون یک قالب سیلیکونی شیاردار استفاده شده است. مزیت‌های این روش عبارتند از:

- امکان شکل دادن راحت و درست الیاف 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 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. پس از ساخت قالب، سیلیکون به داخل آن ریخته می‌شود و پس از گذشت دو روز کامل، زمانی که پخت کامل شود، اقدام به درآوردن سیلیکون از درون قالب پلکسی گلاس می‌گردد (شکل 2).

با رول کردن قالب سیلیکونی مذکور به دور لوله‌ای استوانه‌ای، مندرل اصلی آماده عملیات رشته پیچی شده است. برای انجام عملیات پیچش الیاف از دستگاه رشته پیچی 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 هلیکال و محیطی، دارای ضخامت چهار میلی‌متری می‌باشند که از پیچش ده لایه الیاف رشته‌ای آغشته شده به رزین در داخل شیارهای قالب سیلیکونی متصل شده بر روی مندرل، ساخته شده‌اند.

برای پخت کامل این رزین ME101، 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 می‌شود. به منظور بدست آوردن مدول و استحکام کششی نهایی کامپوزیت، از آزمون نول¹ [16,17] و برای اندازه‌گیری خواص کششی رزین، از آزمون استاندارد ASTM D 638-03 استفاده شده است. همچنین با در نظر گرفتن خواص مکانیکی الیاف کولار و رزین اپوکسی و مراجعه به روابط میکرو مکانیک [18]، بقیه خواص مواد، با محاسبه بدست آمده‌اند. کسر حجمی الیاف نمونه‌ها، 60 درصد می‌باشد که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. خواص مواد در جدول 2 ارائه شده است. همچنین اصولاً باید حداقل سه نمونه استوانه مشبک کامپوزیتی ساخته شده و نتایج آزمون بارگذاری محوری، میانگین‌گیری شود. ولی به دلیل کمبود منابع مالی، تنها یک نمونه سازه ساخت شده است و نتایج تجربی حاصله، با نرم‌افزار آباکوس مقایسه گردیده، مطالعات پارامتری، به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته که در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

و تحت فشار خارجی پرداختند. نتایج نشان داد افزایش پارامترهای زاویه، طول سلول مشبک و سطح مقطع باعث افزایش سختی معادل و بار بحرانی کمانش، تا قبل از رسیدن به مود کمانش موضعی تقویت‌کننده‌ها می‌شود. ولی افزایش بیشتر آن‌ها، کمانش موضعی و کمانش سازه را در پی دارد [15].

پژوهش حاضر، دارای دو هدف اصلی، مطالعه رفتار سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی تحت بار محوری فشاری مرتبه اول و دیگری استحکام باقی‌مانده و قابلیت باربری مجدد سازه، تحت آزمون بار محوری فشاری مرتبه دوم قرار گرفته، می‌باشد. برای این منظور، سازه استوانه‌ای مشبک با شبکه شش‌ضلعی، به روش رشته پیچی در درون شیارهای قالب سیلیکونی ساخته شده است. سازه تحت بارگذاری محوری فشاری قرار گرفته، سپس به منظور بررسی اینکه چه ظرفیتی از ظرفیت تحمل بار اولیه سازه مذکور، قابلیت تحمل بارگذاری مجدد را دارد، سازه مذکور، تحت بارگذاری مجدد قرار گرفته است. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس، مطالعه عددی بر روی سازه، با انواع شبکه‌های مثلثی، شش‌ضلعی و لوزی، با دو نوع المان S4R و SC8R انجام شده، نتایج با آزمون‌های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شده‌اند.

2- معرفی سازه

سازه مورد نظر، یک سازه استوانه‌ای مشبک با نوع شبکه شش‌ضلعی می‌باشد. در ساخت سازه، از الیاف کولار و رزین اپوکسی سرد کار، با نام تجاری ME101 استفاده شده است. این سازه، از هشت جفت ریب (تقویت‌کننده) ماریپیچ و شش ریب (تقویت‌کننده) محیطی تشکیل شده است. که از به هم رسیدن این ریب‌های ماریپیچ و محیطی، شبکه‌های ایزوگرید شکل می‌گیرد. در شکل 1، به منظور معرفی هندسه این سازه، از پارامترهای زاویه‌ی ریب‌ها، تعداد ریب‌ها، جزئیات سطح مقطع (عرض و ارتفاع ریب)، فاصله‌ی بین ریب‌ها استفاده شده است. در جدول 1، مقادیر این پارامترها برای سازه مذکور ارائه شده است.

جدول 1 مشخصات هندسی شبکه و سازه

Table 1 Geometric characteristic of grids and structures		
مشخصات سازه	ارتفاع سازه (L) (mm)	300
	شعاع سازه (R) (mm)	81.9
مشخصات هندسی شبکه	فاصله ریب‌های ماریپیچ (a _b) (mm)	56.73
	فاصله ریب‌های محیطی (a _c) (mm)	60
	عرض ریب‌های ماریپیچ (b _b) (mm)	5
	عرض ریب‌های محیطی (b _c) (mm)	5
	ضخامت لایه مشبک (H) (mm)	4
	زاویه ریب‌های ماریپیچ (φ) (mm)	28.2

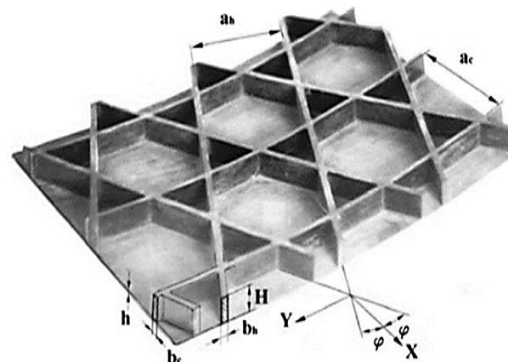


Fig. 1 Geometric parameters of composite lattice structures

شکل 1 پارامترهای هندسی سازه مشبک

2-4- مدل‌سازی سازه با پوسته‌ای معمولی (S4R)

المان‌های پوسته‌ای معمولی برای مدل کردن سازه‌هایی که در یک بعد (ضخامت)، به صورت قابل توجهی کوچک‌تر از دیگر ابعاد باشند، استفاده می‌شوند [19]. در ابتدا، هندسه 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. در انتها، قسمت‌های اضافی سازه، حذف شده‌اند (شکل 5).

در تحلیل با نرم‌افزار آباکوس، از سه گام متوالی برای شبیه‌سازی دو مرتبه بارگذاری اولیه و بارگذاری مجدد استفاده شده است. از نظر زمانی، شرایط اولیه هر گام، عبارت‌اند از شرایط انتهایی گام قبل. در حین حل بر حسب زمان، در هر دو مرتبه بارگذاری، اثر کاهش خواص کامپوزیت، به روش مدل‌سازی آسیب پیش‌رونده⁶ و به کمک گزینه‌های آغاز آسیب⁷ و تکامل آسیب⁸، که از زیرگزینه‌های معیار آسیب هاشین⁸ در نرم‌افزار آباکوس هستند، با استفاده از خواص ماده ذکر شده در جدول 2، اعمال شده است. شرایط انتهایی بارگذاری مرتبه اول، شامل المان‌های آسیب دیده، شرایط ابتدایی بارگذاری مرتبه دوم است. لذا در هر دو مرتبه بارگذاری بر حسب زمان، بخشی از انرژی وارده تحت بارگذاری محوری فشاری به سازه، صرف آغاز و تکامل آسیب و سبب تخریب موضعی آن شده است. پیشرفت آسیب به این معناست، زمانی که ماده 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 سازه به واماندگی برسد.

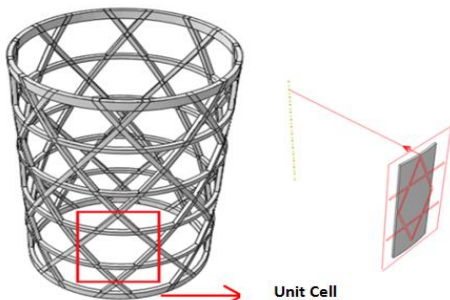


Fig. 4 Structural modeling with continuum shell element (SC8R)

شکل 4 مدل‌سازی سازه با المان پوسته‌ای کانتینیوم (SC8R)

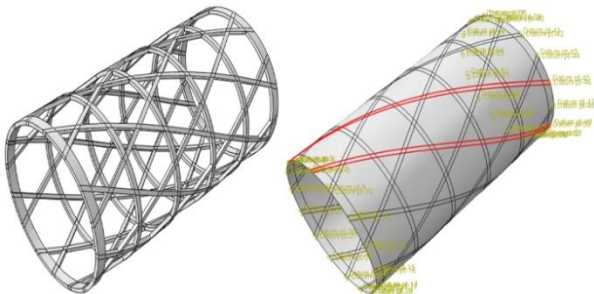


Fig. 5 Structural modeling with conventional shell element (S4R)

شکل 5 مدل‌سازی سازه با المان پوسته‌ای معمولی (S4R)

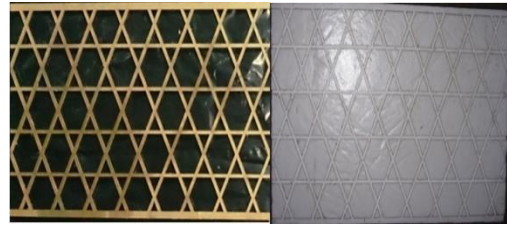


Fig. 2 Plexiglass and silicon mold

شکل 2 قالب پلکسی گلاس و سیلیکونی

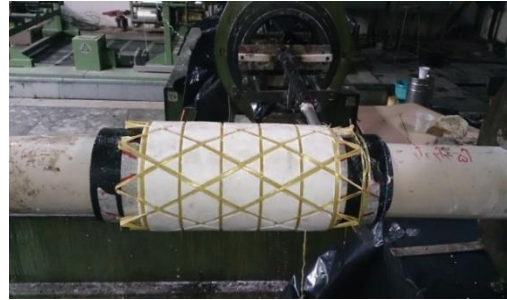


Fig. 3 Filament winding process

شکل 3 فرآیند رشته‌پیچی

جدول 2 خصوصیات مواد

Table 2 The material properties

سایر	چقرمگی شکست (N/mm)	استحکام (MPa)	خصوصیات الاستیک (GPa)
$v_{12} = 0.38$	$G_{FT} = 70$	$X_T = 900$	$E_1 = 40$
$\rho = 1.48 \text{ kg/m}^3$	$G_{FC} = 95$	$X_C = 310$	$E_2 = 4.6$
	$G_{MT} = 0.25$	$Y_T = 30$	$G_{12} = G_{13} = 2.5$
	$G_{MC} = 1$	$Y_C = 100$	$G_{23} = 2$
		$S = 50$	

4- مدل‌سازی و تحلیل المان محدود

در مدل‌سازی این سازه از دو نوع المان پوسته‌ای معمولی¹ و المان پوسته‌ای کانتینیوم² استفاده شده است. برای مدل‌سازی سازه با هر کدام از این المان‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، یک روش مجزا وجود دارد که در ابتدا به توضیح مختصری در این باره پرداخته شده است.

1-4- مدل‌سازی سازه با المان پوسته‌ای کانتینیوم (SC8R)

المان‌های پوسته‌ای کانتینیوم، یک حجم سه بعدی را مش بندی می‌کنند و ضخامت این المان‌ها از هندسه گره‌های آن به دست می‌آیند و این المان‌ها فقط درجات آزادی از نوع جابجایی دارند (سه درجه آزادی برای هر گره). شکل این المان‌ها، مانند المان سالیید بوده اما رفتارهای سینماتیک آن‌ها و نیز معادلات متشکله آن‌ها شبیه المان‌های پوسته‌ای معمولی می‌باشد [19]. در این روش، ابتدا یک پوسته مستطیلی به طول و عرض یک سلول واحد و به شعاع سازه اصلی با استفاده از دستور دوران حجم³ ایجاد می‌شود. سپس طرح یک سلول واحد، بر روی این پوسته ترسیم می‌شود. در نهایت سلول واحد مورد نظر، از درون پوسته مذکور، بریده می‌شود (شکل 4). سپس، سلول واحد مذکور، در راستای شعاعی و طولی سازه، به تعداد پیش‌بینی شده در طراحی، کپی می‌شود. پس از مونتاژ سلول‌های واحد در کنار یکدیگر، بین تمامی آن‌ها قید گره⁴ گذاشته می‌شود تا شبکه در حین تحلیل، یکپارچه باشد.

6 - Damage Initiation
7 - Damage Evolution
8 - Hashin Damage

1 - Conventional Shell
2 - Continuum Shell
3 - Revolution
4 - Tie
5 - Progressive Damage Modeling

برای مش‌بندی سازه، از المان‌های S4R و SC8R استفاده شده است. به منظور همگرایی جواب‌های مسئله، حل‌های متعددی با تعداد المان‌های مختلف انجام شده که در نهایت، تعداد بهینه المان‌های S4R، 12408 عدد و تعداد بهینه المان‌های SC8R، 22176 انتخاب شده است (شکل 7). در شکل 8، مدل‌سازی سازه استوانه‌ای مشبک با الگوهای شبکه لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی، نشان داده شده است.

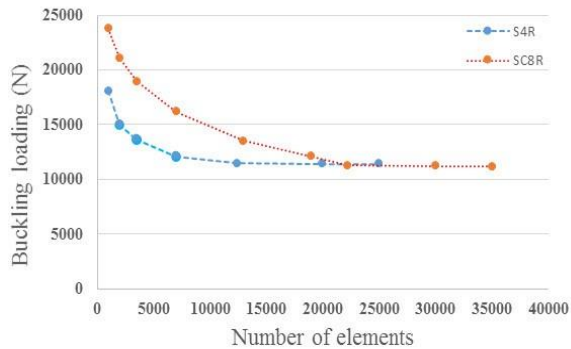


Fig. 7 Mesh convergence for S4R and SC8R elements

شکل 7 همگرایی مش برای المان‌های پوسته‌ای معمولی (S4R) و المان‌های پوسته‌ای کانتینیوم (SC8R)

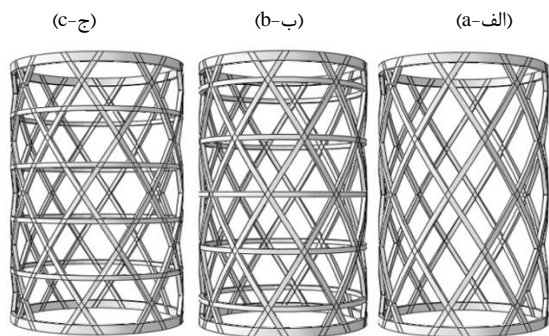


Fig. 8 Modeling the structure with a rhombic (a), triangular (b) and hexagonal (c) lattice patterns in ABAQUS software (from right to left)

شکل 8 مدل‌سازی سازه با الگوی شبکه لوزی (الف)، مثلثی (ب) و شش‌ضلعی (ج) در نرم‌افزار آباکوس

5- نتایج

5-1- اعتبار سنجی و مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش، به دو روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود، به مطالعه رفتار سازه استوانه‌ای مشبک تحت بار محوری فشاری و همچنین استحکام باقی‌مانده سازه مذکور، تحت بارگذاری مرتبه دوم محوری فشاری پرداخته شده است. در واقع، هدف از شبیه‌سازی المان محدود سازه، ارائه روشی کم‌هزینه و کاربردی برای مطالعه رفتار این گونه سازه‌ها می‌باشد. همچنین در ادامه، رفتار سه نوع الگوی شبکه مختلف لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی تحت بارگذاری محوری فشاری مرتبه اول و دوم، مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای انجام آزمون تجربی سازه تحت بار محوری فشاری، دو صفحه فولادی مسطح در بخش‌های تحتانی و فوقانی نمونه‌ها قرار گرفت تا توزیع بار وارده شده به نمونه‌ها، یکنواخت باشد. سپس به فک متحرک دستگاه، جابجایی با سرعت نیم میلی‌متر بر دقیقه داده شد تا بار وارده به سازه، کاملاً شبه استاتیکی

در این تحلیل از حلگر دینامیک صریح¹ استفاده شده است. 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 می‌باشد. تماس‌های بین سازه و صفحات صلب از نوع صفحه به صفحه با ضریب اصطکاک 0.5 تعریف شده است. مسئله در سه مرحله (گام) حل شده است. در گام اول صفحه صلب بالای سازه به صورت جابجایی کنترل به کمک گزینه گام آهسته² در نرم‌افزار آباکوس، در راستای محوری سازه به طرف پایین حرکت می‌کند و سازه را تحت بار محوری فشاری قرار می‌دهد، تا جایی که سازه دچار فروریزش شود. سپس در گام دوم، بارگذاری از سازه آغاز می‌شود. یعنی صفحه مذکور، به آرامی به طرف بالا حرکت می‌کند و به موقعیت اولیه خود باز می‌گردد. سپس در گام سوم، مجدداً صفحه صلب با شرایط توضیح داده شده در گام اول، به سازه (سازه‌ای که در گام اول، آسیب دیده و خواص مکانیکی آن، با توجه به معیار تخریب هاشین، کاهش یافته) نیرو وارد کرده، استحکام باقی‌مانده سازه آسیب دیده در بارگذاری مرتبه اول را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. ترتیب و توالی بارگذاری، در شکل 6، به صورت جدول شرایط مرزی (ردیف) و گام‌های بارگذاری (ستون) در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. مطابق این شکل، اعمال بارگذاری به صورت تعریف شرایط مرزی از نوع جابجایی، به ترتیب زیر است:

- شرایط مرزی اول: صفحه صلب قرار گرفته در زیر سازه، در لحظه اولیه، در همه جهات (شش درجه آزادی) مقید شده است و تا انتهای حل، در همه گام‌ها ادامه می‌یابد.
- شرایط مرزی دوم: صفحه صلب قرار گرفته بر روی سازه، در لحظه اولیه، در همه جهات مقید بوده و در آغاز گام اول، در جهت محوری آزاد شده، بر روی سازه نیروی فشاری به صورت جابجایی کنترل (گام آهسته) به سمت پایین وارد می‌کند. این شرایط مرزی، فقط تا انتهای گام اول حل مسئله حاکم بوده و در دو گام بعدی، غیرفعال شده است.
- شرایط مرزی سوم: صفحه صلب قرار گرفته بر روی سازه، در گام دوم، با مقید بودن سایر درجات آزادی، در جهت بالا شروع به حرکت کرده، بار را به صورت جابجایی کنترل (گام آهسته) از روی سازه بر می‌دارد. این شرایط مرزی، در گام سوم، غیرفعال شده است.
- شرایط مرزی چهارم: صفحه صلب قرار گرفته بر روی سازه، با مقید بودن سایر درجات آزادی، مجدداً بر روی سازه، نیروی فشاری به صورت شرایط جابجایی کنترل به سمت پایین وارد می‌کند. این شرایط مرزی، فقط در گام سوم حل مسئله حاکم است.

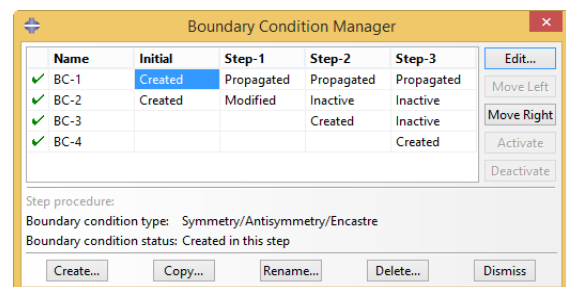
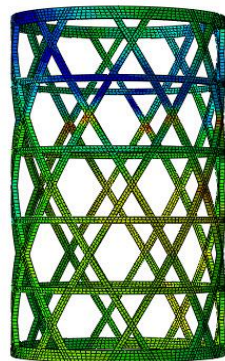
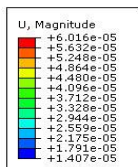
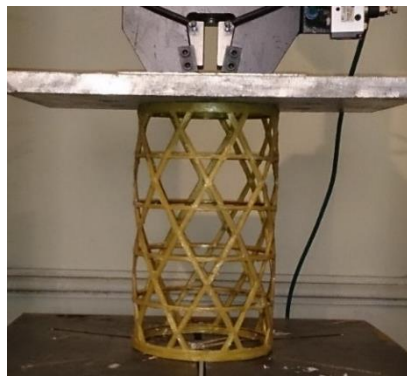


Fig. 6 Boundary conditions and loadings in ABAQUS software

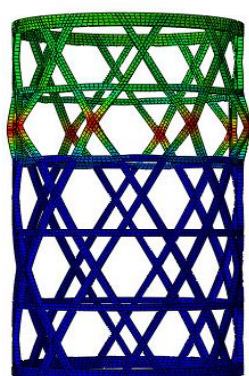
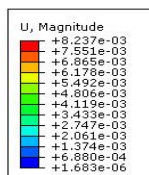
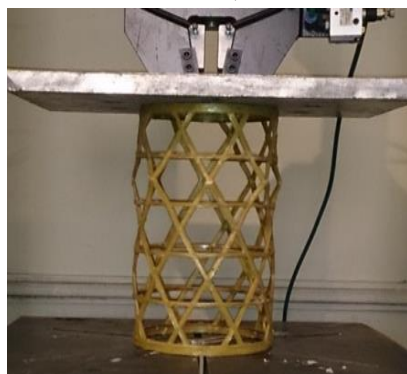
شکل 6 شرایط مرزی و بارگذاری در نرم‌افزار آباکوس

¹ - Explicit

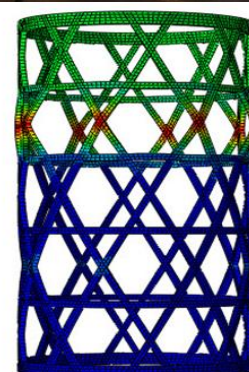
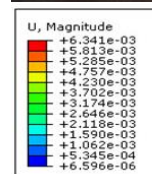
² - Smooth Step



(ب) - (ب)



(ج) - (ج)



(الف) - (الف)

Fig. 9 Experimental and numerical deformation of the structure with hexagonal lattice pattern at different loading stages under compressive axial load; (a) Collapse during first loading stage (b) After complete unloading in the first stage (c) Collapse during second loading stage

شکل 9 تغییر شکل تجربی و عددی سازه با شبکه شش‌ضلعی در مراحل مختلف تحت بار محوری فشاری (الف) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه اول (ب) لحظه پس از باربرداری کامل مرتبه اول (ج) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه دوم

باشد. آزمون 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 ادامه مراحل تحقیق، به منظور مطالعه استحکام باقی‌مانده و ظرفیت مجدد باربری، سازه مذکور مجدداً (برای مرتبه دوم) تحت بار محوری فشاری قرار گرفت. نتایج نشان داد که سازه 8280 نیوتن بار تحمل کرد و سپس از محل آسیب آزمون اول، دچار فروریزش گردید. همچنین نتایج نشان دادند که علی‌رغم تخریب سازه در آزمون اول، سازه هنوز قابلیت باربری دارد، به طوری که 78.81 درصد از قابلیت خود در تحمل بار محوری فشاری را حفظ کرده است. همچنین در بارگذاری مجدد، به دلیل آسیب‌دیدگی سازه، سفتی سازه کاهش یافته است، به طوری که سازه در لحظه شکست مجدد، دچار 28.3 درصد جابجایی بیشتر شده است. در شکل 9، نمایی از جابجایی سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی در بارگذاری مراحل اول و دوم (تحت نیروی محوری فشاری)، در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سازه، ارائه شده است. همچنین در شکل 10، نمودارهای نیرو-جابجایی سازه در آزمون تجربی نشان داده شده است.

مطابق شکل 9، نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند که در لحظه آغاز فروریزش، حداکثر تغییر شکل سازه در راستاهای محوری و شعاعی، در بارگذاری مرتبه دوم، بیشتر از مرتبه اول است. همچنین با اندازه‌گیری طول استوانه کامپوزیتی به کمک خط‌کش میلی‌متری، پس از باربرداری مرتبه اول، سازه کاملاً به طول اولیه خود بازگشته است. البته این بازگشت، طبق مشاهدات، بلافاصله نبوده و پس از گذشت لحظاتی، قطعه استوانه‌ای به طور آهسته، به طول اولیه بازگشته است. تغییر شکل به جامانده، از مرتبه 10^{-5} متر است و با بازرسی چشمی در آزمون تجربی، قابل تشخیص نیست.

در شکل‌های 12 و 13 به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی سازه در شبیه‌سازی المان محدود با دو نوع المان S4R و SC8R به همراه نمودار آزمون تجربی سازه نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، به طور کلی حداکثر جابجایی سازه در لحظه فروریزش، در المان‌های پوسته‌ای معمولی (S4R)، تقریباً مساوی المان‌های پوسته‌ای کانتینیوم (SC8R) می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی شده با هر دو المان، مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمون تجربی دارند.

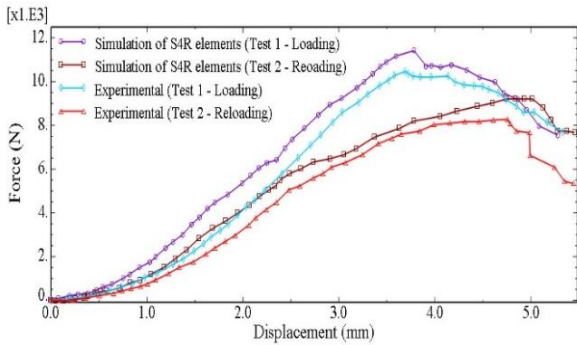


Fig. 12 Numerical simulation diagram (S4R element) and experimental testing of structures with hexagonal lattice pattern under first and second stages of compressive axial loading

شکل 12 نمودار شبیه‌سازی عددی (المان S4R) و آزمون تجربی سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری در بارگذاری مراحل اول و دوم

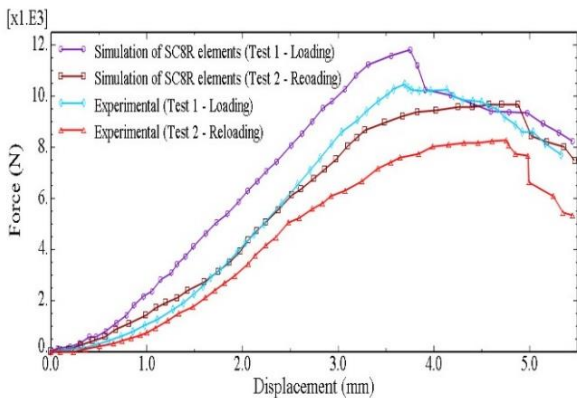


Fig. 13 Numerical simulation diagram (SC8R element) and experimental testing of structures with hexagonal lattice pattern under first and second stages of compressive axial loading

شکل 13 نمودار شبیه‌سازی عددی (المان SC8R) و آزمون تجربی سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری در بارگذاری مراحل اول و دوم

2-5- اثر الگوی شبکه بر حداکثر استحکام و استحکام باقی‌مانده سازه تحت بار محوری فشاری

با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، حداکثر استحکام و استحکام باقی‌مانده سازه با الگوهای لوزی شکل، مثلثی شکل و شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری متوالی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج جابجایی سازه در شبیه‌سازی عددی، برای الگوهای لوزی و مثلثی شکل، تحت بار محوری فشاری به ترتیب در شکل 14 و 15، ارائه شده است. همچنین در شکل 16 و 17، به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی سازه با الگوی شبکه لوزی و مثلثی نشان داده شده‌اند.

در تحلیل المان محدود، به منظور تعیین مود دقیق تخریب، استحکام نهایی مواد نیز در نرم‌افزار وارد شد تا مود واقعی تخریب مشخص شود. مقدار نیروی بحرانی کمانش (جایی که نمودار نیرو-جابجایی افت ناگهانی کرده است) در تحلیل المان محدود (با المان پوسته‌ای معمولی) برابر 11456.6 نیوتن است که این مقدار، حدود 9 درصد بیشتر از آزمون تجربی سازه مذکور می‌باشد. در شکل 11 سازه شبیه‌سازی شده به همراه مود تخریب آن (مود شکست فشاری الیاف) ارائه شده است. از این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که قبل از اینکه سازه دچار کمانش شود، تنش در سازه، از حداکثر استحکام فشاری آن، فراتر رفته (سازه دچار آسیب شده) و این عامل، سبب شکست سازه شده است. همچنین تغییر شکل و محل شروع تخریب سازه در هر دو روش شبیه‌سازی المان محدود و آزمون تجربی، دارای تطابق کامل می‌باشد (شکل‌های 9 و 11).

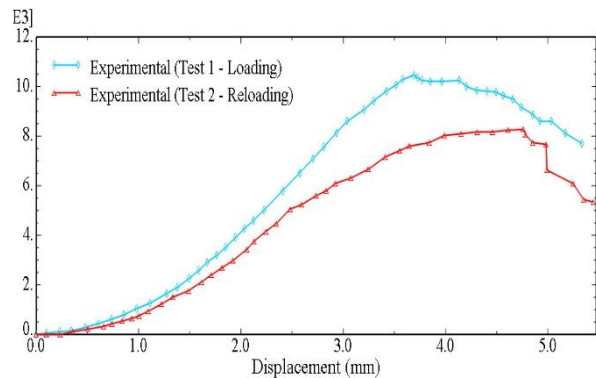


Fig. 10 Structure test diagram with hexagonal lattice pattern under compressive axial load

شکل 10 نمودار آزمون سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی تحت بار محوری فشاری

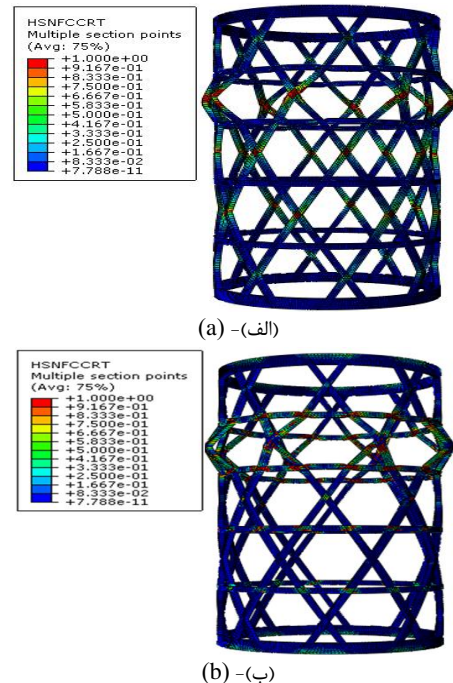


Fig. 11 Damage simulation of the structures with hexagonal pattern in ABAQUS software with (a) S4R element (b) SC8R element

شکل 11 شبیه‌سازی آسیب سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی در نرم‌افزار آباکوس (الف) المان پوسته‌ای معمولی (ب) المان پوسته‌ای کانتینیوم

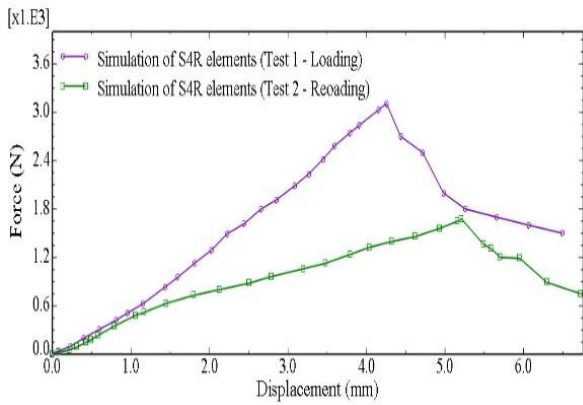


Fig. 16 Numerical simulation diagram of a structure with a rhombic lattice pattern under compressive axial load (S4R element)

شکل 16 نمودار شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه لوزی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

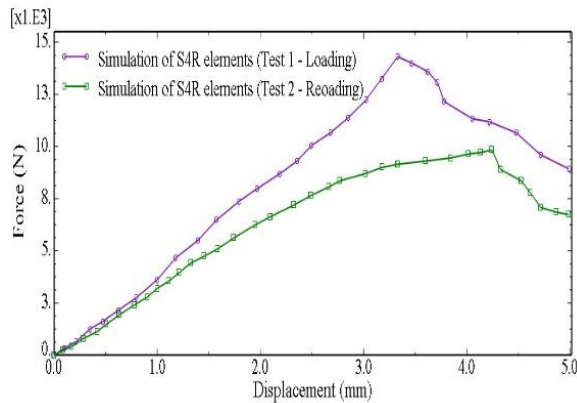


Fig. 17 Numerical simulation diagram of a structure with a triangular lattice pattern under compressive axial load (S4R)

شکل 17 نمودار شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه مثلثی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

همان طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود، سازه با الگوی شبکه لوزی شکل، به علت عدم وجود ریب‌های محیطی و سفتی پایین، تحت بار محوری فشاری، ناپایدار بوده و دچار تغییر شکل بشکهای می‌شود و تخریب سازه به صورت تخریب ریب‌ها در فشار، نمایان می‌شود. همچنین در بارگذاری مجدد، این سازه به دلیل تخریب ریب‌ها در فشار، 45.99 درصد از ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهد. شکل 19، نتایج سازه با الگوی مثلثی شکل را تحت بار محوری فشاری نشان می‌دهد. این سازه به دلیل شبکه چگالتر و وجود ریب‌های محیطی، از سفتی بالاتری برخوردار می‌باشد به طوری که تحت بارگذاری محوری فشاری، عملکرد بهتری نسبت به الگوهای شبکه لوزی و شش‌ضلعی نشان می‌دهد. در واقع این الگوی شبکه، با انتقال نیرو بین ریب‌های خود، سبب افزایش باربری نهایی سازه می‌شود. همچنین فروریزش سازه، از محل ریب‌های مارپیچ قرار گرفته در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی سازه می‌باشد که این امر، سبب کاهش 30.89 درصد از ظرفیت اولیه باربری سازه، در بارگذاری مجدد می‌گردد. در جدول 3، نتایج شبیه‌سازی المان محدود سازه شامل پارامترهای حد اکثر نیروی فروریزش سازه، وزن سازه، انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه و جایجایی عمودی سازه در لحظه فروریزش، به همراه نتایج آزمون‌های تجربی برای سازه با الگوهای شبکه لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی ارائه شده است.

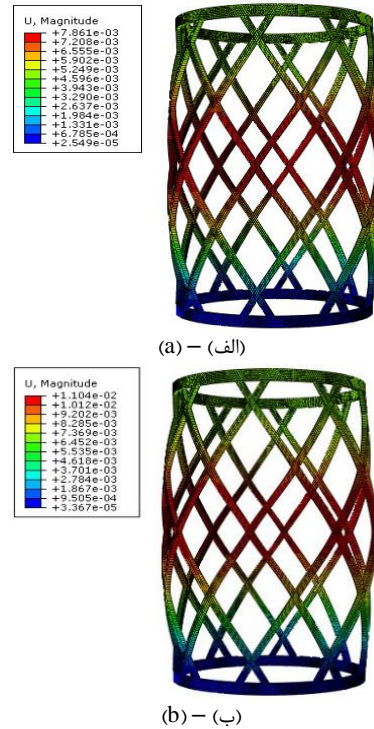


Fig. 14 Deformation of the structure with rhombic lattice pattern at different loading stages under compressive axial load; (a) Collapse during first loading stage (b) Collapse during second loading stage

شکل 14 تغییر شکل سازه با شبکه لوزی در مراحل مختلف تحت بار محوری فشاری (الف) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه اول (ب) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه دوم

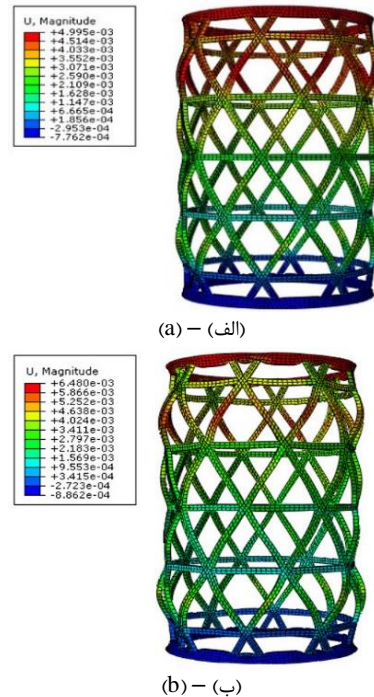


Fig. 15 Deformation of the structure with triangular lattice pattern at different loading stages under compressive axial load; (a) Collapse during first loading stage (b) Collapse during second loading stage

شکل 15 تغییر شکل سازه با شبکه مثلثی در مراحل مختلف تحت بار محوری فشاری (الف) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه اول (ب) لحظه آغاز فروریزش سازه در بارگذاری مرتبه دوم

جدول 3 حداکثر نیروی فروریزش، وزن، انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه، جابجایی عمودی در لحظه فروریزش و زمان حل شبیه‌سازی برای الگوهای مختلف شبکه
Table 3 Maximum collapse force, weight, absorbed energy up to the point of collapse of the structure, vertical displacement at the moment of collapse and simulation solution time for different grid patterns

هندسه شبکه	نوع المان	حداکثر نیروی فروریزش (N)			وزن سازه (kg)	انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه (J)			جابجایی در لحظه فروریزش (mm)		زمان حل شبیه‌سازی (دقیقه)
		در روش عددی	بارگذاری اول	بارگذاری مجدد		درصد جذب انرژی باقی‌مانده	بارگذاری اول	بارگذاری مجدد	بارگذاری اول	بارگذاری مجدد	
لوزی	S4R	3110.3	1680.1	54.01	0.207	7183.3	4102.1	57.1	4.15	5.24	164
مثلثی	S4R	14326.4	9901.1	69.11	0.280	25750.7	16343.4	63.5	3.34	4.25	462
شش‌ضلعی	S4R	11456.6	9222.8	80.5	0.243	24101.1	20920.5	86.8	3.8	4.92	235
شش‌ضلعی	SC8R	11289.6	9102.9	80.63	0.243	24480.3	21210.2	86.6	3.74	4.88	752
شش‌ضلعی (روش تجربی)	-	10505	8280	78.81	0.245	23067.3	19501.5	84.5	3.71	4.75	-

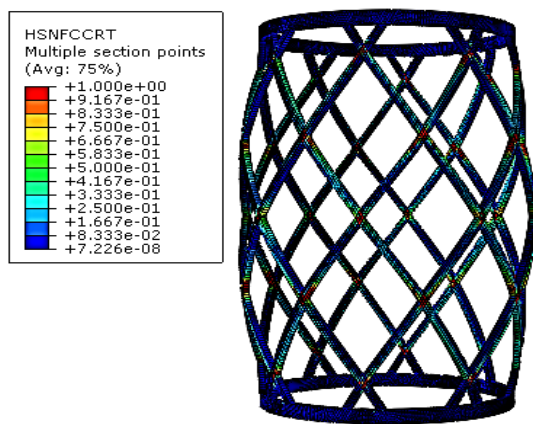


Fig. 18 Numerical simulation of a structure with a rhombic lattice pattern under compressive axial load (S4R element)

شکل 18 شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه لوزی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

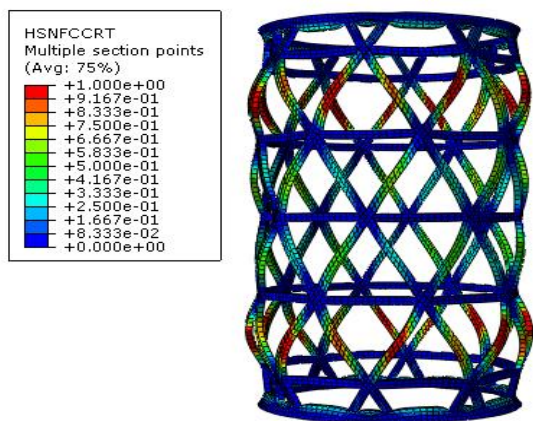


Fig. 19 Numerical simulation of a structure with a triangular lattice pattern under compressive axial load (S4R element)

شکل 19 شبیه‌سازی عددی سازه با الگوی شبکه مثلثی تحت بار محوری فشاری (المان S4R)

همانطور که مشاهده می‌شود، سازه با الگوی شبکه مثلثی، بیشترین استحکام فروریزش، بیشترین جذب انرژی تا نقطه فروریزش و کمترین جابجایی عمودی در لحظه فروریزش را در بارگذاری مرتبه اول و در طرف مقابل، سازه با الگوی شبکه لوزی، کمترین استحکام فروریزش، کمترین جذب انرژی تا نقطه فروریزش و بیشترین جابجایی عمودی در لحظه فروریزش را در بارگذاری مرتبه اول، دارا می‌باشند. در واقع، وجود شبکه چگالتز و وجود ریب‌های محیطی، سبب افزایش قابل توجهی در سفتی سازه گردیده‌اند، به طوری که این مهم، تأثیر مستقیمی در افزایش و کاهش پارامترهای مذکور گذاشته است. در بارگذاری مجدد (مرتبه دوم)، سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی، عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوهای شبکه دارد، به طوری درصد استحکام باقی‌مانده سازه (نتایج شبیه‌سازی عددی) در الگوهای شبکه شش‌ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب، برابر 80.5، 69.11 و 54.01 می‌باشد. نکته قابل ذکر دیگر اینکه جابجایی در لحظه فروریزش در بارگذاری مجدد، نسبت به بارگذاری اول، در الگوهای شبکه شش‌ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب، حدود 29، 27 و 26 درصد افزایش نشان می‌دهد.

1-2-5- مقایسه پارامتر استحکام ویژه سازه

در طراحی مهندسی، بخصوص سازه‌های هوایی، معیار وزن، یکی از پارامترهای مهم می‌باشد. پارامتر استحکام ویژه، به صورت نسبت حداکثر نیروی تحمل شده به وزن، تعریف شده است. در شکل 20، استحکام ویژه سازه با الگوهای شبکه مختلف، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در بارگذاری مرتبه اول، به ترتیب سازه با الگوی شبکه مثلثی، شش‌ضلعی و لوزی، از استحکام ویژه بالاتری برخوردار می‌باشند. همچنین در بارگذاری مرتبه دوم، سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی، از استحکام ویژه بالاتری برخوردار می‌باشد.

2-2-5- مقایسه از نظر جذب انرژی ویژه تا نقطه آغاز فروریزش

یکی دیگر از پارامترهای مهم در این گونه سازه‌ها، جذب انرژی می‌باشد که از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی بدست می‌آید. اما جذب انرژی به تنهایی، کافی نیست و در طراحی مهندسی در برخی کاربردهای عملی که سبکی و حداقل وزن، مهم است، این جذب انرژی ویژه است که از اهمیت بالاتری برخوردار است. لذا از تقسیم مقدار انرژی جذب شده به جرم سازه، جذب انرژی ویژه بدست می‌آید. در شکل 21، انرژی ویژه جذب شده برای هر سه الگوی شبکه، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوی شش‌ضلعی از عملکرد بهتری در پارامتر جذب انرژی ویژه تا نقطه فروریزش، در هر دو بارگذاری مراحل اول و دوم برخوردار می‌باشد.

شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مقاله، با کمک نرم‌افزار آباکوس بر روی یک دستگاه رایانه با مشخصات سخت‌افزاری پردازش مرکزی 7 هسته‌ای و حافظه جانبی 8 گیگابایت انجام پذیرفته است. مدت زمان حل مسأله فروریزش استوانه مشبک کامپوزیتی با شبکه شش‌ضلعی، با استفاده

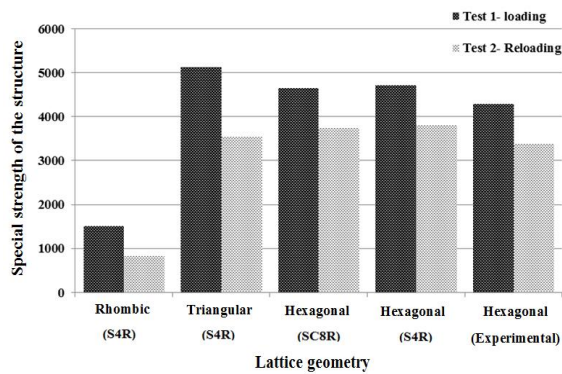


Fig. 20 Specific strength diagram of the structure for different grid patterns

شکل 20 نمودار استحکام ویژه سازه (نسبت حداکثر نیروی تحمل شده به وزن) برای الگوهای شبکه مختلف

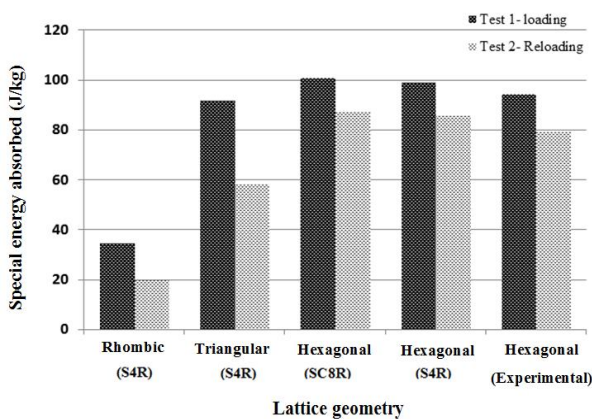


Fig. 21 Specific energy absorption diagram of the structure up to the collapse point for different grid patterns

شکل 21 نمودار انرژی ویژه جذب شده تا نقطه فروریزش سازه برای الگوهای شبکه مختلف

7-مراجع

- [1] Vasiliev, V., Barynin, V. and Rasin, A., "Anisogrid Lattice Structures—Survey of Development and Application" Composite structures, Vol. 54, No. 2-3, pp. 361-370, 2001.
- [2] Vasiliev, V. and Razin, A., "Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications" Composite structures, Vol. 76, No. 1-2, pp. 182-189, 2006.
- [3] Vasiliev, V. V., Barynin, V. A. and Razin, A. F., "Anisogrid Composite Lattice Structures—Development and Aerospace Applications" Composite structures, Vol. 94, No. 3, pp. 1117-1127, 2012.
- [4] Totaro, G. and Gürdal, Z., "Optimal Design of Composite Lattice Shell Structures for Aerospace Applications" Aerospace Science and Technology, Vol. 13, No. 4-5, pp. 157-164, 2009.
- [5] Morozov, E., Lopatin, A. and Nesterov, V., "Finite-Element Modelling and Buckling Analysis of Anisogrid Composite Lattice Cylindrical Shells" Composite Structures, Vol. 93, No. 2, pp. 308-323, 2011.
- [6] Yazdani, M. and Rahimi, G., "The Behavior of Gfrp-Stiffened and-Unstiffened Shells under Cyclic Axial Loading and Unloading" Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011.
- [7] Yazdani, S. and Rahimi, G., "Experimental and Numerical Stress Analysis of Glass Fiber-Reinforced Polymer (Gfrp)-Stiffened Shells with Cutout under Axial Loading" Scientific Research and Essays, Vol. 8, No. 21, pp. 902-916, 2013.

از المان پوسته متداول، مدت 78 دقیقه و با استفاده از المان پوسته پیوسته، مدت 248 دقیقه بوده است. بنابراین، حل یک مسأله با ابعاد هندسی و بارگذاری و شرایط مرزی مشابه، با کمک المان پوسته پیوسته، 3.2 برابر المان پوسته متداول، زمان می‌برد. لذا اگر هدف از شبیه‌سازی، بررسی رفتار کلی نیرو-جابجایی محوری باشد، نه تحلیل مؤلفه‌های جزئی تنش در نواحی دارای تمرکز تنش، استفاده از المان پوسته متداول، صرفه اقتصادی دارد.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار استحکامی استوانه مشبک کامپوزیتی با الگوهای شبکه لوزی، مثلثی و شش‌ضلعی، به روش عددی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین برای اعتبار سنجی مدل عددی، سازه با الگوی شبکه شش‌ضلعی ساخته شده، دو بار متوالی مورد آزمایش بارگذاری فشار محوری قرار گرفت. اصولاً برای تحلیل دقیق‌تر تنش‌های عمودی و برشی بین لایه‌ای، به خصوص در محل‌های تمرکز تنش مانند محل تقاطع ریب‌ها و نزدیک مرزهای بالا و پایین سازه، استفاده از المان پوسته کانتینیوم، به خصوص در تحلیل‌های غیرخطی مادی و هندسی، بهتر است. لیکن برای مدلسازی راحت‌تر و حل سریع سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با ساختارهای مشابه با ساختار مورد استفاده در این مقاله، از نظر نسبت ضخامت یا ارتفاع ریب‌ها به شعاع، استفاده از المان پوسته معمولی، از دقت قابل قبول برخوردار است. چون در مدلسازی به کمک المان پوسته معمولی، نیازی به ایجاد قید گره جهت برقراری اتصال بین سلول‌های واحد مجاور که سبب افزایش زمان حل به کمک رایانه می‌شود، وجود ندارد.

نتایج نشان دادند که این سازه‌ها، اولاً عملکرد مناسبی در بارگذاری محوری فشاری دارند و ثانیاً به خاطر ماهیت شبکه‌ای بودن ساختار سازه، علی‌رغم اینکه وقتی در بارگذاری مرتبه اول، تحت آسیب اولیه و فروریزش قرار می‌گیرند، همچنان بخش قابل توجهی از خاصیت باربری خود را در بارگذاری مرتبه دوم، حفظ کرده و تنها بخش کوچکی از ظرفیت نامی خود را از دست می‌دهند، به طوری که:

- 1- در بارگذاری محوری فشاری مرتبه اول، سازه با الگوهای شبکه مثلثی، شش‌ضلعی و لوزی، به ترتیب از انرژی جذب شده تا نقطه فروریزش سازه، استحکام و استحکام ویژه بیشتر و از جابجایی عمودی تا نقطه فروریزش سازه کمتری (سفتی بالاتری) برخوردار می‌باشند.
- 2- در بارگذاری مرتبه دوم، سازه با الگوهای شبکه شش‌ضلعی، شبکه مثلثی و لوزی، به ترتیب مقادیر 80.5، 69.11 و 54.01 درصد از استحکام اولیه خود را حفظ کرده و لذا قابلیت تحمل بار محوری فشاری مجدد را دارا می‌باشند.
- 3- سازه با الگوهای شبکه شش‌ضلعی، شبکه مثلثی و لوزی، به ترتیب از قابلیت جذب انرژی ویژه بیشتری در هر دو بارگذاری مرتبه اول و دوم برخوردار می‌باشند.
- 4- جابجایی در لحظه فروریزش در بارگذاری مجدد، نسبت به بارگذاری مرتبه اول، در الگوهای شبکه شش‌ضلعی، مثلثی و لوزی، به ترتیب، حدود 29، 27 و 26 درصد افزایش نشان می‌دهد.
- 5- بعد از باربرداری کامل و قبل از بارگذاری مرتبه دوم، استوانه مشبک کامپوزیتی آسیب دیده از بارگذاری مرتبه اول، به طول اولیه خود باز می‌گردد. این از خصوصیات سازه با هندسه مشبک است.

- [8] Lai, C., Wang, J. and Liu, C., "Parameterized Finite Element Modeling and Buckling Analysis of Six Typical Composite Grid Cylindrical Shells" *Applied Composite Materials*, Vol. 21, No. 5, pp. 739-758, 2014.
- [9] Ren, M., Li, T., Huang, Q. and Wang, B., "Numerical Investigation into the Buckling Behavior of Advanced Grid Stiffened Composite Cylindrical Shell" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 33, No. 16, pp. 1508-1519, 2014.
- [10] Talezadehlari, A. and Rahimi, G. H., "The Effect of Geometrical Imperfection on the Axial Buckling of Unstiffened and Stiffened Composite Cylinders with and without Cutout" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 245-256, 2017.
- [11] Fadavian, A., Davar, A., Jam, J. E. and Taghavian, H., "Buckling Strength Optimization of Fabrication Factors of Composite Lattice Cylinders Using Experimental-Statistical Method (Taguchi)" *Polymer Composites*, Vol. 40, No. 5, pp. 1850-1861, 2019.
- [12] Davar1, A., Azarafza2, R. and Bagheri, V., "Experimental and Numerical Analysis of Composite Lattice Truncated Conical Structures with and without Carbon Nanotube Reinforcements under Axial Compressive Force" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 4, pp. 418-425, 2018.
- [13] Khalili, S. M. R., Sedigh, Y. and Mir Mohammad Hossein Ahari, S. M., "Experimental and Numerical Study of the Buckling of Semi-Cylindrical Composite Lattice" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 269-276, 2016.
- [14] shahgholian ghahfarokhi, d. and Rahimi, G. H., "Prediction of the Critical Buckling Load of Stiffened Composite Cylindrical Shells with Lozenge Grid Based on the Nonlinear Vibration Analysis" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 135-143, 2018.
- [15] Rostami, B. and Shahrjerdi, A., "Buckling Analysis of Composite Lattice Cylinder Whit Inner and Outer Shell under External Pressure" *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 3, pp. 147-156, 2019.
- [16] "Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe" *ASTM-D2290*, 2017.
- [17] Charan, V. S., Vardhan, A. V., Raj, S., Rao, G. R., Rao, G. and Hussaini, S., "Experimental Characterization of CFRP by Nol Ring Test" *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18, pp. 2868-2874, 2019.
- [18] Gibson, R. F., "Principles of Composite Material Mechanics", CRC Press, pp. 82-93, 2011.
- [19] "ABAQUS 6.14 Analysis User's Manual", Section 29.6.1, 2014.