



پیش بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با شبکه های لوزی شکل بر اساس آنالیز ارتعاشات غیر خطی

داود شاهقلیان قهفرخی¹، غلامحسین رحیمی^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 111-141115، mme.modares.ac.ir، rahimi_gh

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 دی 1396

پذیرش: 08 اسفند 1396

ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

کلید واژگان:

پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده‌ی

مشبک

روش همبستگی با ارتعاشات

کمانش

ساخت

تحلیل عددی

چکیده

پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک به دلیل خواص منحصر بفردشان، یکی از سازه‌های پر کاربرد در صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی می‌باشد. در دهه‌های اخیر تحقیقات بسیاری زیادی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک، بدون خرابی یا شکست انجام شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های غیرمخرب، روش همبستگی ارتعاشی یا وی‌سی‌تی می‌باشد که مبنای آن آنالیز ارتعاشات غیرخطی می‌باشد. هدف تحقیق حاضر پیش‌بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با شبکه‌های لوزی شکل با استفاده از روش وی‌سی‌تی می‌باشد. برای این منظور در ابتدا تحلیل ارتعاشات خطی و غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با استفاده از نرم-افزار المان محدود آباکوس و در بارهای فشاری مختلف انجام شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از نتایج عددی، بار بحرانی کمانش خطی سازه مذکور محاسبه شد. سپس به کمک روش وی‌سی‌تی بار بحرانی کمانش غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده مشبک پیش‌بینی گردید. در ادامه و برای صحت‌سنجی نتایج روش وی‌سی‌تی، پنج پوسته‌ی کامپوزیتی تقویت شده مشابه و با شرایط یکسان و با استفاده از روش پیش‌ساخته‌ی الیاف ساخته شد و تحت آزمون فشار محوری قرار داده شد. در نهایت بار بحرانی کمانش تجربی به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف بار بحرانی کمانش غیرخطی پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی با بار بحرانی کمانش به دست آمده از آزمایش تجربی کمتر از 3 درصد می‌باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش وی‌سی‌تی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با دقت بسیار بالا برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با شبکه‌های لوزی شکل می‌باشد.

Prediction of the critical buckling load of stiffened composite cylindrical shells with lozenge grid based on the nonlinear vibration analysis

Davoud Shahgholian Ghahfarokhi, Gholam Hossein Rahimi*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*P.O.B. 14115- 111, Tehran, Iran, rahimi_gh@mmodares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 12 January 2018

Accepted 27 February 2018

Available Online 17 March 2018

Keywords:

Grid Stiffened Composite Cylinder Shells

Vibration Correlation Technique

Buckling

Fabrication

Numerical Analysis

ABSTRACT

Due to unique properties, grid stiffened composite cylinder shells are used extensively in aviation, marine and automotive industry. In recent decades, several studies are done to predict the critical buckling load of grid stiffened composite cylinder shells without breakdown or failure. Vibration Correlation Technique (VCT) is one of the most important non-destructive methods that based on nonlinear vibration analysis. The aim of this research is the prediction of the critical buckling load of stiffened composite cylinder shells with lozenge grid by using VCT. For this purpose, linear and nonlinear vibration analysis of composite cylindrical shells were performed in different compressive loads by using finite element software ABAQUS, firstly. In the next step, linear buckling critical load was determined by using numerical methods. Then, non-linear critical buckling load of grid stiffened composite cylinder shells was predicted by using VCT. To validate the results of VCT, five composite cylindrical shells were fabricated by using filament winding method with same conditions and was placed under axial compression test. Finally, the critical buckling load was measured experimentally. The results show that the difference between the critical buckling load of VCT with experimental buckling load is less than 3%. This subject implies that VCT is suitable for prediction of critical buckling load of stiffened composite cylinder shells with lozenge grid with very high accuracy.

1- مقدمه

وزن کم باشد، روزبه‌روز محسوس‌تر می‌شود. با روی کار آمدن مواد کامپوزیتی، به دلیل ویژگی‌های خاص این مواد، ایده‌ی جایگزینی این سازه‌ها به جای سازه‌های فلزی به ذهن طراحان و مهندسان رسید. تحلیل‌های مختلفی نظیر

با پیشرفت صنعت و فناوری به‌ویژه در صنایع هوایی، فضایی و خودروسازی، نیاز به سازه‌هایی که دارای خواص ایده آلی نظیر استحکام بالا و درعین حال

Please cite this article using:

D. Shahgholian Ghahfarokhi, Gh. H. Rahimi, 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. 04, pp. 135-143, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پیش‌بینی بار کمانش سازه‌های جدار نازک را دارا می‌باشد، قادر به تعیین شرایط مرزی حقیقی سیستم نیز می‌باشد. روش وی‌سی‌تی ابتدا به طور موفقیت آمیزی برای تیرها و ستون‌های تحت بار محوری به کار گرفته شد. در ادامه این تجربه موفق، زمینه ساز استفاده از آن برای سازه‌های دیگر گردید. در سال 2002، زیمرمن و هون [11] نشان دادند که شرایط مرزی اثر قابل ملاحظه‌ای بر بار کمانش پوسته‌های کامپوزیتی می‌گذارد. بنابراین وی‌سی‌تی با تعیین شرایط مرزی حقیقی و فراهم آوردن اطلاعات بهتر برای شبیه‌سازی عددی، مانند مدل‌های المان محدود و کارهایی نظیر کارهای هیلبرت و همکاران [12] و دزن هارد و همکاران [13]، نقش به‌سزایی در این زمینه ایفا می‌کند. در سال 2015 آبراموویچ و همکاران [14] پیش‌بینی بار کمانش به کمک روش وی‌سی‌تی را برای سه پنل ساخته شده به همراه یک پوسته استوانه‌ای مقاوم بررسی کردند. آن‌ها مبنای کارشان را رفتار پس‌کمانش پایدار و ناپایدار سازه‌ها قرار دادند. برخلاف پوسته که دارای رفتار پس‌کمانشی ناپایدار می‌باشد، پنل‌ها دارای رفتار پس‌کمانشی پایدار هستند که اندازه‌گیری فرکانس طبیعی را تا بار کمانش تجربی واقعی میسر می‌سازد. آبراموویچ و همکاران ابتدا فرکانس طبیعی پنل‌ها را تا 50 درصد بار کمانش تجربی بدست آوردند. سپس با استفاده از برازش مرتبه دو ارتباط بین نیروی محوری و فرکانس به دست آورده شد. در نهایت با استفاده از برونیایی، بار بحرانی کمانش برای پنل‌های مذکور به دست آورده شد. آبراموویچ و همکاران در ادامه روش مناسبی برای استفاده از وی‌سی‌تی در سازه‌های گوناگون ارائه کردند و سپس با افزایش بار تا نزدیکی‌های بار کمانش محاسبه شده و نیز اندازه‌گیری فرکانس طبیعی، ملاحظه شد که در نزدیکی‌های بار کمانش تجربی، یک انحراف شدید در نمودار فشار محوری- مجذور فرکانس برای مد اول دیده می‌شود که محل این انحراف شدید بار کمانش پیش‌بینی شده می‌باشد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این روش برای هر سه پنل نتایج مناسبی به همراه دارد. اما در ادامه آبراموویچ و همکاران نشان دادند که استفاده از این دو روش برای پوسته استوانه تقویت شده مناسب نیست. در ادامه، جانسون و همکاران [15] تلاش فراوانی برای بهبود وی‌سی‌تی انجام داده‌اند. آن‌ها ابزارهای نیمه تحلیلی برای توسعه و پیدایش نیمه کاربردی این روش برای پوسته‌ها معرفی کردند و اثرات غیرخطی وضعیت استاتیکی و نقایص هندسی را در نظر گرفته‌اند.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی بار کمانشی بدون تخریب سازه و خلأ مرجع مناسبی برای تعیین بار کمانشی پوسته کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از آنالیز ارتعاشات غیرخطی، هدف تحقیق حاضر پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده با شبکه لوزی شکل با استفاده از روش وی‌سی‌تی می‌باشد. در ابتدا شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت می‌پذیرد و به کمک آن آنالیز عددی ارتعاشات خطی و غیرخطی در مقادیر مختلف بار فشار محوری انجام شده و فرکانس طبیعی در بارگذارهای مذکور بدست می‌آید. در مرحله بعد، با شبیه‌سازی عددی بار کمانش پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت شده بدون در نظر گرفتن نقایص هندسی، بدست می‌آید. سپس به کمک روش وی‌سی‌تی مقدار بار کمانش بحرانی پیش‌بینی می‌گردد. در ادامه و برای صحت‌سنجی نتایج، پنج نمونه کاملاً مشابه و دارای شرایط یکسان ساخته می‌شود و با انجام آزمون فشار محوری، بار کمانش تجربی نمونه‌های ساخته شده بدست می‌آید. در نهایت نتایج حاصل از روش وی‌سی‌تی با نتایج تجربی بدست آمده مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

تحلیل استاتیکی، دینامیکی، ارتعاشی، شکست و کمانشی برای طراحی سازه‌ها انجام می‌شود. از آن جایی که سازه‌های جدار نازک عموماً تحت بارهای فشاری قرار می‌گیرند، آنالیز کمانشی یکی از مهم‌ترین تحلیل در خرابی این نوع سازه‌ها می‌باشد. در دهه‌های اخیر تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شده است.

در سال 1996 جانکی و همکاران [1] روشی برای محاسبه‌ی بار کمانش پوسته‌های تقویت شده‌ی مشبک ارائه نمودند و نام آن را تئوری تقویت کننده‌های معادل نامیدند. در سال 2003 کیدانه [2] یک مدل تحلیلی برای محاسبه بار کمانشی پوسته‌های تقویت‌شده ارائه نموده و مطالعه پارامتری به بررسی اثرات زاویه و تعداد ریب، زاویه رشته پیچی و ضخامت پوسته بر بار کمانشی انجام داد. در سال 2010 یزدانی و همکاران [3] رفتار پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده در برابر بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری را بررسی نمودند. براساس نتایج تجربی به‌دست آمده، نشان داده شد که پوسته با شبکه‌بندی مثلثی از لحاظ استحکام مناسب‌ترین نوع پوسته می‌باشد. یزدانی و رحیمی در سال 2011 [4] اثرات تغییرشکل شبکه و تعداد ریب‌های مارپیچ را بر ظرفیت باربری پوسته‌های تقویت شده به روش تجربی مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که ظرفیت ریب‌های محوری نسبت به ریب‌های محیطی در تحمل بار کمانشی بیشتر می‌باشد. در سال 2013 زندگی و همکاران [5] اثر پروفیل سطح مقطع تقویت‌کننده بر بار محوری را مورد بررسی قرار دادند. در سال 2015 رحیمی و همت نژاد [7,6] اثر تغییرات شرط مرزی و ضخامت پوسته بر روی فرکانس طبیعی پوسته استوانه‌های کامپوزیتی ساده و تقویت شده را بررسی کردند و نشان دادند در ضخامت‌های کم، پوسته تقویت شده فرکانس بالاتری نسبت به پوسته تقویت نشده دارد که این موضوع نشان دهنده بالاتر بودن سفتی سازه‌های تقویت‌شده می‌باشد. با افزایش ضخامت پوسته میزان این تقویت‌کنندگی کم می‌شود. در همین سال طالع‌زاده و رحیمی [8] روش جدید معادلسازی برای محاسبه بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده ارائه نمودند. از نتایج این کار می‌توان به دقت مدل ارائه شده نسبت به نتایج شبیه‌سازی اشاره کرد. طالع‌زاده و رحیمی [9] در سال 2017 اثر نقص هندسی بر کمانش محوری پوسته‌های ساده و مشبک کامپوزیتی با و بدون گشودگی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که اثر نقص هندسی بر بار بحرانی پوسته مشبک کمتر از پوسته‌ی ساده می‌باشد.

در دهه‌های اخیر تحقیقات مختلفی برای ارتباط ارتعاشات با کمانش سازه‌های مختلف توسط محققین متعددی نظیر سینگر و همکاران [10] بیان شده است که نتایج این تحقیقات منجر به ابداع روش‌های غیرمخرب برای پیش‌بینی بار کمانش گردید. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، رهیافت همبستگی با ارتعاشات یا وی‌سی‌تی¹ است که در واقع پل ارتباطی بین کمانش و ارتعاشات می‌باشد و بدون شکست، خرابی و رسیدن به ناپایداری، می‌توان بار کمانش سازه را پیش‌بینی نمود. این روش بر اساس آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی عمل می‌نماید. این روش با توجه به تشابهات شکل‌مدهای ارتعاشی و کمانشی و بر مبنای بدست آوردن فرکانس طبیعی یک سازه‌ی بارگذاری شده می‌باشد که با افزایش بار وارده، تغییرات فرکانس طبیعی را بدست می‌آورد و با استفاده از تغییرات به دست آمده بار بحرانی کمانش سازه مذکور را پیش‌بینی می‌نماید. در سال 1998 یک جمع‌بندی مختصر از فرضیات، کاربردها، ابزار آزمایشات و نتایج روش وی‌سی‌تی توسط سینگر و همکاران [10] منتشر گردید. این روش علاوه بر این که قابلیت

¹ Vibration Correlation Technique (VCT)

2- معرفی روش وی‌سی‌تی

روشنی روش وی‌سی‌تی یا همبستگی ارتعاشی برای برقراری ارتباط بین مفاهیم تحلیل کمانشی و ارتعاشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس این روش بدون به وجود آمدن خرابی و یا شکست می‌توان بار بحرانی کمانشی سازه را پیش‌بینی نمود. با توجه به مزیتی که این روش دارد اخیراً مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. این روش نخستین بار توسط سوزا و همکاران [17,16] پایه‌گذاری شد و در ادامه توسط آربلو و همکاران [19,18] توسعه داده شد. آربلو و همکاران در سال 2015 با انتخاب سه پوسته استوانه کامپوزیتی با لایه‌چینی نامتقارن، بار پیش‌بینی شده توسط روش وی‌سی‌تی را به دست آوردند. از مقایسه بار پیش‌بینی شده با بار تجربی به دست آمده مشاهده شد که اختلاف نتایج بسیار ناچیز می‌باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش مذکور می‌باشد. مراحل پیاده‌سازی روش وی‌سی‌تی به شرح زیر می‌باشد:

گام اول: در ابتدا باید با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود بار بحرانی کمانش خطی (P_{cr}) سازه و فرکانس خطی سازه (f_0) موردنظر را به دست آورد. که این موضوع با انجام دو شبیه‌سازی کمانشی و فرکانسی مشخص می‌گردد.

گام دوم: در گام بعدی باید محدوده‌ای از بارهای فشار اعمالی در نظر گرفته شود و فرکانس‌های طبیعی متناظر به دست آورده شود. به عبارت بهتر در هر بار اعمالی به سازه باید فرکانس طبیعی سازه تحت همان بار به دست آورده شود. این موضوع نیاز به تحلیل ارتعاشات سازه به صورت خطی و یا غیرخطی است. شایان ذکر است که این تحلیل می‌تواند به صورت عددی و یا تجربی انجام شود.

گام سوم: در این مرحله باید مقادیر $(1 - P)$ را برحسب $(1 - F^2)$ بدست آورد. که در آن $P = p/P_{cr}$ و $F = f_m/f_0$ می‌باشد. که p بار فشار محوری، P_{cr} بار کمانش خطی پوسته، f_m فرکانس ارتعاشاتی مود اول در بار p و f_0 فرکانس طبیعی مود اول پوسته بدون بار می‌باشد. از برازش $(1 - P)$ برحسب $(1 - F^2)$ منحنی به دست می‌آید که مینیمم مقدار این منحنی را پارامتر ناک-دان¹ یا 3^2 می‌نامند.

گام چهارم: در مرحله آخر با استفاده از رابطه‌ی (1) می‌توان بار بحرانی پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی را به دست آورد [18]:

$$P_{VCT} = P_{cr} \left(1 - \sqrt{3^2}\right) \quad (1)$$

گام چهارم: در مرحله آخر با استفاده از رابطه‌ی (1) می‌توان بار بحرانی پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی را به دست آورد [18]:

$$P_{VCT} = P_{cr} \left(1 - \sqrt{3^2}\right) \quad (1)$$

3- مطالعه عددی

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس نسخه 6-14 [20] استفاده شده است که از جمله نرم‌افزارهای اجزاء محدود بسیار کاربردی در این حوزه می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار به خاطر قابلیت گسترده‌ای که در مدل‌سازی مواد مختلف و نیز توانایی سفرشی کردن آن به وسیله برنامه نویسی دارا می‌باشد، در محیط‌های تحقیقاتی آکادمیک هم بسیار مورد استفاده است.

3-1- مدل‌سازی هندسی

برای مدل‌سازی پوسته‌ی تقویت‌شده با شبکه‌های لوزی شکل، تمامی بخش‌های مختلف هندسه پوسته شامل پوسته و ریب‌ها در محیط پارت نرم‌افزار آباکوس مدل شده و با ترکیب این بخش‌ها در محیط اسمبلی² پوسته استوانه تقویت شده ایجاد می‌شود (مطابق شکل 1). با توجه به این که در مدل

3-2- اعمال خواص مکانیکی به اجزاء

برای اختصاص خواص مکانیکی به پوسته، ماده الاستیک و اورتوتروپ انتخاب می‌شود. لایه‌های کامپوزیت را می‌توان از قسمت کامپوزیت لای‌آپ⁴ ایجاد نمود. از آنجایی که ضخامت پوسته نسبت به سایر ابعاد آن ناچیز است، بایستی نوع المان را کانونشنال شل⁵ انتخاب نمود. برای تعریف لایه‌های کامپوزیت و زوایای رشته‌پیچی ابتدا بایستی یک دستگاه مختصات استوانه‌ای مجزا از دستگاه عمومی بر روی پوسته تعیین نمود. حال با توجه به محورهای مختصاتی که برنامه به این دستگاه اختصاص می‌دهد، زاویه چرخش مقادیر 0 و 90 درجه در دستگاه جدید نسبت به محور استوانه وارد می‌شود تا جهت رشته پیچی حول محور پوسته با محور طولی تعریف گردد. سپس تعداد 6 لایه با ضخامت 28.0 میلی‌متر برای پوسته تعریف می‌شود.

3-3- تعیین خواص مکانیکی مواد

برای تعیین خواص مکانیکی پوسته و ریب ابتدا، خواص مکانیکی الیاف و ماتریس رزین اپوسکی تعیین شده است. در مرحله بعد به کمک روابط میکرومکانیک، و با توجه به کسر حجمی الیاف، خواص مکانیکی پوسته و

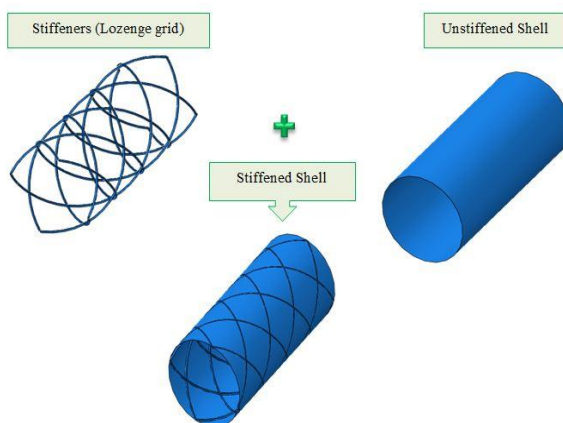


Fig. 1 Geometric model of stiffened composite cylindrical shells with lozenge grid

شکل 1 مدل هندسی پوسته کامپوزیتی تقویت شده

³ Tie

⁴ Composite layup

⁵ Conventional shell

¹ knock-down

² Assembly

تقویت‌کننده‌ها محاسبه شده است.

3-3-1- محاسبه خواص مکانیکی الیاف

خواص مکانیکی الیاف شیشه مطابق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی 2256¹ [21] و با استفاده از دستگاه اینسترون 5566² به‌دست آمده است (شکل 2). در این آزمایش نمونه‌های تست کشش الیاف 25 میلی‌متر بوده است و نمونه‌ها به گونه‌ای درون فک پنوماتیک دستگاه قرار می‌گیرند که طول مؤثر آن‌ها به 20 میلی‌متر کاهش می‌یابد. با استفاده از نمودار مدول الاستیسیته در راستای طولی الیاف (E_1) و استحکام کششی الیاف (X^T) قابل محاسبه خواهند بود. طبق استاندارد برای هر دوک نخ، پنج تست کشش انجام شد. با میانگین‌گیری از نتایج به‌دست آمده، مدول الاستیسیته در راستای طولی الیاف و استحکام کششی الیاف به ترتیب برابر 576.25 گیگاپاسکال و 901.409 مگاپاسکال محاسبه شده است. از آن‌جا که الیاف شیشه ماده‌ای ایزوتروپ است، خواص مکانیکی آن در جهت محوری و عرضی یکسان خواهد بود.

3-3-2- محاسبه خواص مکانیکی رزین اپوکسی

برای تعیین خواص مکانیکی ماتریس رزین اپوکسی از تست کشش استفاده شد. بدین منظور، مطابق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی 638³ [22] نمونه‌های تست کشش به کمک قالب‌های سیلیکونی ساخته شدند. با استفاده از نتایج به‌دست آمده می‌توان مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و کرنش شکست ماتریس رزین اپوکسی را تعیین نمود. لازم به ذکر است که ماتریس رزین اپوکسی ایزوتروپ می‌باشد و خواص مکانیکی آن در جهت محوری و عرضی یکسان خواهد بود. خواص مکانیکی محاسبه شده برای الیاف و رزین در جدول 1 خلاصه شده است.

3-3-3- تعیین درصد حجمی الیاف

جهت تعیین خواص مکانیکی پوسته و ریب باید درصد حجمی الیاف به کار رفته در هر کدام مشخص شود. درصد حجمی الیاف مطابق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی 2584⁴ و با استفاده از آزمایش سوزاندن الیاف به‌دست آمده است. بدین منظور قطعات کوچکی از پوسته و ریب بریده شده و درون کوره قرار داده شده است. سپس دمای کوره به گونه‌ای تنظیم شده است که طی یک ساعت رفته رفته از دمای محیط به دمای 600 درجه سانتی‌گراد برسد و به مدت یک ساعت در این دما بماند. طی این فرآیند رزین اپوکسی به‌طور کامل سوخته و از بین خواهد رفت. بدین ترتیب با اندازه‌گیری وزن قطعات قبل و بعد از سوزانده شدن، درصد وزنی الیاف را می‌توان محاسبه نمود. با داشتن چگالی الیاف و ماتریس کسر حجمی الیاف در پوسته و ریب تعیین می‌گردد.

3-3-4- تعیین خواص مکانیکی پوسته و ریب

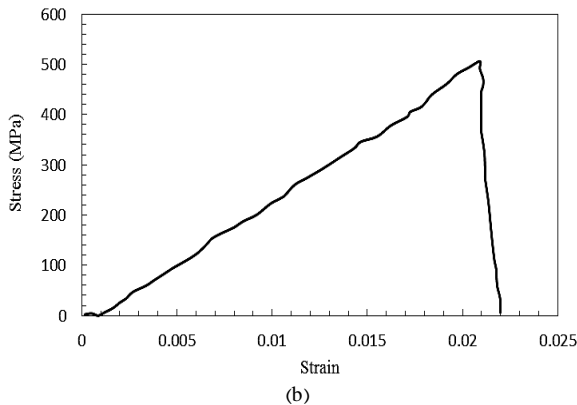
پس از تعیین خواص مکانیکی الیاف و رزین اپوکسی و نیز کسر حجمی الیاف در پوسته و ریب، در این مرحله با استفاده از روابط میکرومکانیک (روابط (2) تا (10)) خواص مکانیکی پوسته و ریب محاسبه شده است (جدول 2) [23]. در این روابط درصد حجمی الیاف 20.31 درصد برای پوسته و 40.54 درصد برای تقویت‌کننده‌ها براساس نمونه‌های واقعی در نظر گرفته شده است.

$$\rho = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (2)$$

¹ ASTM D2256
² INSTRON 5566
³ ASTM D 638
⁴ ASTM-D 2584



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Tensile test of fiber (b) Stress-strain diagram of fiber

شکل 2 (a) دستگاه تست کشش اینسترون 5566 (b) نمودار تنش-کرنش الیاف شیشه

جدول 1 خواص مکانیکی رزین اپوکسی و الیاف شیشه

Table 1 Mechanical property of epoxy resin and glass fiber

مشخصه	الیاف شیشه	زمینه (رزین اپوکسی و سخت‌کننده به نسبت 2 به 1)
چگالی (gr/cm^3)	1.2810	1.0667
مدول الاستیسیته (GPa)	26.576	0.8817
ضریب پواسون	0.22	0.36

$$E_1 = E_f v_f + E_m v_m \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E_3} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{E_f} + \frac{\eta_2 v_m}{E_m} \right], \quad \eta_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{G_m}{G_{12}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{13}} = \frac{1}{v_f + \eta_G v_m} \left[\frac{v_f}{G_f} + \frac{\eta_G v_m}{G_m} \right], \quad \eta_G = \frac{1}{4(1 - \nu_m)} \left(3 - 4\nu_m + \frac{G_m}{G_f} \right) \quad (5)$$

$$G_{23} = \frac{G_m}{\left(1 - \sqrt{v_f \left(1 - \frac{G_m}{G_f} \right)} \right)} \quad (6)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_f v_f + \nu_m v_m \quad (7)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1 \quad (8)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (9)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (10)$$

جنس ای‌گلس⁶ انتخاب گردید که دارای استحکام بالا و نحوه‌ی پیش‌مناسب می‌باشد.

4-2- روش ساخت

روش‌های مختلفی برای ساخت پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک وجود دارد. در گذشته برای ساخت تقویت کننده‌های مارپیچ از روش لایه‌چینی دستی استفاده می‌شد و تقویت‌کننده‌ها در اتوکلاو مورد پخت قرار می‌گرفت، تا سازه شکل بگیرد. این روش قابلیت اتومات شدن را نداشته و هزینه ساخت را بالا می‌برد. در روش رشته‌پیچی، الیاف به‌طور پیوسته به رزین آغشته شده و به دور مندرل پیچیده می‌شود تا شکل سازه ایجاد شود. اتومات بودن فرآیند و به حداقل رسیدن نیاز به اتوکلاو، هزینه ساخت را پایین آورده و همچنین می‌توان الیاف را در جهت بار اعمالی پیچید تا نمونه‌ای با استحکام بالا ایجاد شود. در این تحقیق نیز برای ساخت پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با شبکه‌های لوزی از روش رشته‌پیچی استفاده شده است. در ابتدا یک قالب سیلیکونی که از قبل ساخته شده بود بر روی مندریل دستگاه نصب می‌گردد. سپس با استفاده از حرکت خطی و دورانی دستگاه پیچش الیاف، الیاف داخل شیارهای قالب قرار می‌گیرد و رزین نیز به‌صورت دستی به داخل شیار تزریق می‌شود (مطابق شکل 5). پس از پایان پیچش الیاف برای ایجاد تقویت‌کننده، مرحله پیچش پوسته به دور تقویت‌کننده آغاز می‌شود. برای پیچش پوسته می‌توان از پیچش الیاف به کمک تغذیه‌کننده پوسته استفاده کرد. اما به دلیل غیریکنواختی توزیع الیاف هنگام پیچش، نیاز به زمان زیاد برای پیچش الیاف و عدم پخش رزین مناسب، به‌جای پیچش الیاف برای ایجاد پوسته از پیچش پارچه وون⁷ استفاده می‌شود، در ادامه 6 لایه پارچه وون به‌صورت دستی روی قالب پیچیده می‌شود. تا ضخامت موردنظر حاصل گردد. در "شکل 6"، تصویری از فرایند ساخت نشان داده شده است. برای پخت و آماده‌سازی نمونه‌ها از دستگاه هرزگرد استفاده می‌کنیم. نمونه به مدت 24 ساعت در داخل دستگاه هرزگرد قرار می‌گیرد تا علاوه بر توزیع یکنواخت رزین، عملیات پخت نیز صورت پذیرد (مطابق شکل 7). در فرآیند ساخت 5 نمونه ساخته شد، به طوری که هر یک از نمونه‌ها دارای طول میانگین 30 سانتی‌متر، قطر داخلی 16 سانتی‌متر و ضخامت پوسته 1.68 میلی‌متر می‌باشند (جدول 3).

4-3- اعمال شرایط مرزی

برای اعمال شرایط مرزی و گیردار کردن دو انتهای پوسته استوانه‌ها، ابتدا دو

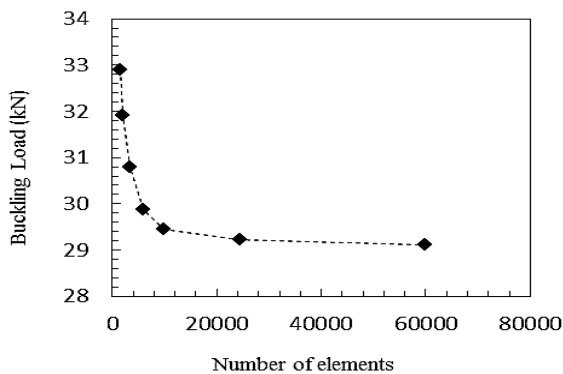


Fig. 3 Mesh convergence

شکل 3 نمودار همگرایی مش

⁶ E-Glass

⁷ Woven

در روابط (2) تا (10)، ρ ، ρ_m ، ρ_f به ترتیب چگالی الیاف، ماتریس و کامپوزیت نهایی را بیان می‌کند. E_1 و E_2 به ترتیب مدول الاستیسیته در راستای طولی و عرضی را نشان می‌دهد. v_m و v_f کسر حجمی الیاف و ماتریس می‌باشند. v_m ، v_f و θ_{12} به ترتیب ضریب پواسن الیاف، ماتریس و کامپوزیت می‌باشند. G_m ، G_f ، G_{12} و G_{23} به ترتیب مدول برشی الیاف، ماتریس، کامپوزیت در صفحه 1-2 و کامپوزیت در صفحه 2-3 می‌باشد.

4-3- تعریف نوع حل و خروجی‌های موردنظر

در این تحقیق ابتدا یک تحلیل کمانش خطی برای به‌دست آوردن بار کمانش خطی پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت‌شده بدون در نظر گرفتن نقایص هندسی صورت می‌پذیرد. در ادامه تحلیل فرکانس خطی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی بودن هندسی و تغییرشکل‌های بزرگ برای پوسته بدون نقایص هندسی، انجام می‌گیرد تا با افزایش بار فشاری پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک، میزان کاهش فرکانس طبیعی مشخص گردد. در مرحله بعد در یک تحلیل ارتعاشات غیرخطی نقایص هندسی با ضریب نقص‌اولیه¹ 2% ضخامت، اعمال می‌گردد تا تغییرات فرکانس طبیعی با افزایش بار فشار محوری بدست آمده، به واقعیت نزدیکتر گردد.

3-5- مطالعه‌ی همگرایی مش

برای پوسته از المان 8 آر² و برای تقویت‌کننده‌ها از المان سی³دی²⁰ آر² استفاده شد. برای مطالعه‌ی همگرایی مش، شش حالت مختلف با در نظر گرفتن تعداد المان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت (شکل 3). در شش حالت بررسی شده بهترین حالت، حالت پنجم با در نظر گرفتن 24565 المان می‌باشد، چرا که سرعت حل مسئله و جواب بدست آمده مناسب است. لذا از این حالت مش‌بندی جهت تحلیل استفاده شد. "شکل 4" تصویری از مدل نهایی شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

4- ساخت نمونه‌ها

4-1- مواد مصرفی

برای ساخت نمونه‌ها نیاز به رزین و الیاف می‌باشد. رزین مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها از نوع اپوکسی با ترکیب پلیمر اولیه سی‌وای² 219 و سخت‌کننده‌ی اچ‌وای³ 5161 انتخاب شد که علت این انتخاب استحکام بالای آن، کاربرد بسیار زیاد در صنایع مختلف و در دسترس بودن آن می‌باشد و درصد ترکیب رزین به سخت‌کننده با نسبت 2 به 1 است. الیاف مورد استفاده نیز از

جدول 2 خواص مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده

Table 2 Mechanical property of shell and stiffener			
مشخصه	پوسته	تقویت‌کننده	
چگالی (gr/cm ³)	1.537	1.152	
مدول الاستیسیته (GPa)	6.43	11.16	E_1
	6.43	1.61	E_2
	2.33	1.61	E_3
مدول برشی (GPa)	0.964	1.21	G_{12}
	0.964	1.21	G_{13}
	1.12	0.859	G_{23}
ضریب پواسن	0.28	0.304	ν_{12}
	0.28	0.304	ν_{13}
	0.087	0.127	ν_{23}

¹ Imperfection

² S8R

³ C3D20R

⁴ CY219

⁵ HY5161

جدول 3 مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده

تعداد	ضخامت پوسته (mm)	طول (mm)	قطر داخلی (mm)	مقدار پارچه استفاده شده (m)
5	68.1	300	160	3

حلقه اپوکسی در لبه‌های بالایی و پایینی نمونه‌ها ایجاد شده است تا اجازه هرگونه جابجایی و دوران از لبه‌های پوسته استوانه‌ها گرفته شود و مانع از کمانش محلی در لبه‌ها گردد و شرایط مرزی گیردار موردنظر به‌طور کامل اعمال گردد. بدین ترتیب لبه‌های بالایی و پایینی پوسته استوانه به میزان 5 میلی‌متر توسط حلقه اپوکسی از داخل و خارج احاطه گشته‌اند تا شرایط مرزی گیردار موردنظر به‌طور کامل اعمال گردد. شکل نهایی نمونه‌های ساخته شده در "شکل 8" مشاهده می‌گردد.

5- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج شبیه‌سازی و نتایج تحلیل کمانش خطی ذکر می‌گردند، سپس بار کمانش پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی و با استفاده از آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی بدست می‌آید و در مرحله بعد به مقایسه نتایج با نتایج آزمون‌های تجربی پرداخته می‌شود.

5-1- بار خطی کمانش

در این پژوهش برای پیش‌بینی بار کمانش به روش وی‌سی‌تی، لازم است با استفاده از آنالیز المان محدود و شبیه‌سازی عددی، مقدار بار کمانش خطی نمونه را محاسبه نماییم. در این شبیه‌سازی نمونه به‌صورت پوسته استوانه کامل و بدون عیب و نقص هندسی در نظر گرفته می‌شود. بار کمانش خطی به‌دست آمده از تحلیل عددی برابر با 29.25 kN می‌باشد.

5-2- پیش‌بینی بار کمانش به کمک آنالیز ارتعاشات خطی

در این مرحله با انجام تحلیل ارتعاش خطی و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی بودن هندسه و تغییرشکل‌های بزرگ برای پوسته استوانه‌ای، فرکانس طبیعی پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده در بارهای فشاری مختلف به‌دست می‌آید. در نتیجه با افزایش بار فشاری، میزان کاهش فرکانس طبیعی مشخص می‌گردد. فرکانس طبیعی چهار مود اول نمونه در جدول 4 ارائه شده است. در ادامه با استفاده از یک برازش درجه 2، منحنی $(1 - P)^2$ برحسب $(1 - F^2)$ به‌دست می‌آید. همان‌گونه که از "شکل 9" مشخص است مقدار منیم این منحنی مقدار F^2 را می‌دهد که این مقدار برابر 0.03 می‌باشد. در نهایت به کمک رابطه‌ی (1) مقدار بار کمانش بحرانی پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی براساس آنالیز ارتعاشات خطی به‌دست خواهد آمد که مقدار آن برابر 24.15 kN می‌باشد.

5-3- پیش‌بینی بار کمانش به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی

در ادامه برای بررسی اثرات نقایص هندسی، علاوه‌بر در نظر گرفتن اثرات غیرخطی بودن هندسه و تغییرشکل‌های بزرگ، نقایص هندسی نیز با ضریب نقص اولیه 2% ضخامت، اعمال می‌گردد تا تغییرات فرکانس طبیعی با افزایش بار فشار محوری به‌دست آمده و به واقعیت نزدیکتر گردد. ضریب نقص اولیه در قسمت کیوردس¹ نرم‌افزار به‌صورت کدنویسی وارد می‌گردد و همچنین با استفاده از تحلیل استاتیک ریکس² اثر این ضریب بر نتایج اعمال

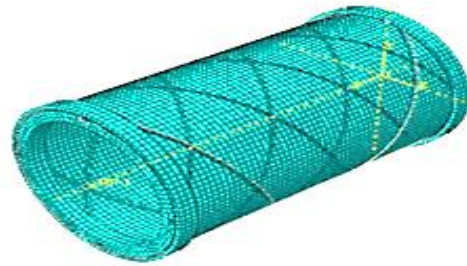


Fig. 4 Final model in Abaqus

شکل 4 مدل نهایی درآباکوس



Fig. 5 Fabrication process of stiffeners

شکل 5 فرایند ساخت تقویت کننده‌ها



Fig. 6 Fabrication process of specimens

شکل 6 فرایند ساخت نمونه‌ها



Fig. 7 Resin curing & distribution process

شکل 7 عملیات پخت و توزیع رزین

¹ Keywords² Static riks

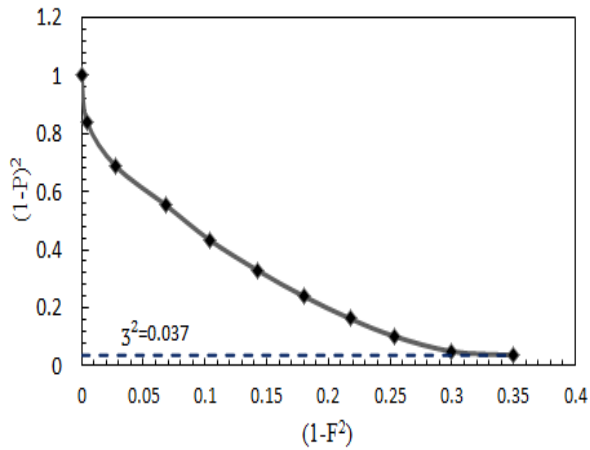


Fig. 9 Result of VCT by linear frequency

شکل 9 نمودار وی‌سی‌تی رسم شده به کمک فرکانس خطی



Fig. 8 Final specimens

شکل 8 نمونه‌های ساخته شده نهایی

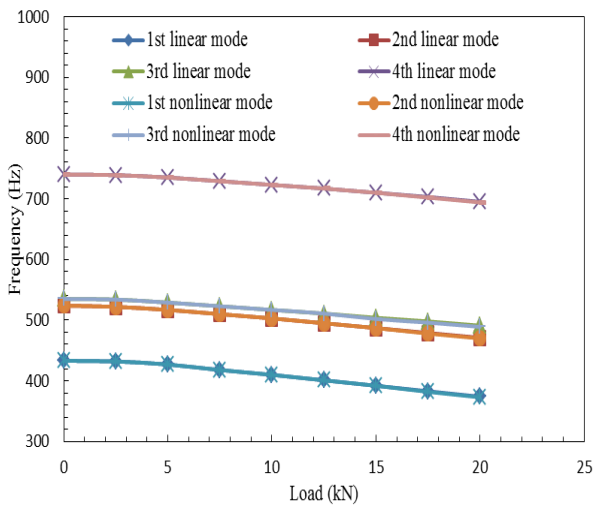


Fig. 10 Linear and nonlinear frequency

شکل 10 نمودار فرکانس طبیعی خطی و غیرخطی در بارهای فشاری مختلف

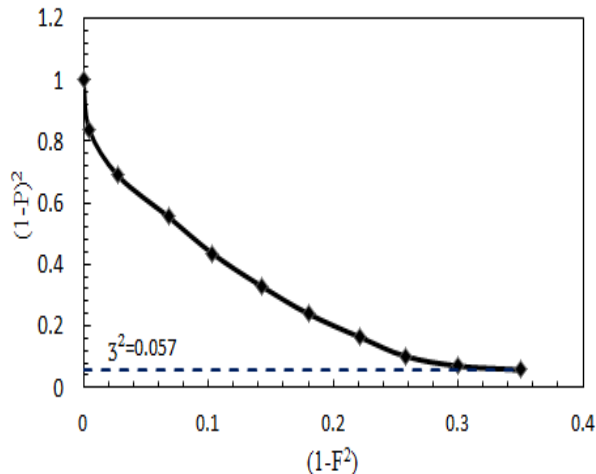


Fig. 11 Result of VCT by nonlinear frequency

شکل 11 نمودار وی‌سی‌تی رسم شده به کمک فرکانس غیرخطی

از آنالیز ارتعاشات غیرخطی برابر با 22.24 kN به‌دست می‌آید.

5-4- آزمون فشار محوی

در این قسمت برای صحت‌سنجی مسأله و ارزیابی نتایج حاصل از پیش‌بینی

می‌گردد. فرکانس طبیعی چهار مود اول ارتعاشات غیرخطی پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت شده در جدول 5 ارائه شده است. نمودار "شکل 10" نیز اختلاف فرکانس طبیعی خطی و غیرخطی را برای چهار مود اول نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش فشار محوری، کاهش بیشتری در فرکانس طبیعی رخ می‌دهد که این ناشی از اثرات نقایص هندسی می‌باشد. اکنون پیش‌بینی بار کمانش به روش وی‌سی‌تی را با استفاده از مقادیر فرکانس غیرخطی مود اول ارتعاشات در بارهای فشاری مختلف انجام می‌شود. ابتدا مقادیر $(1-P)^2$ برحسب $(1-F^2)$ بدست می‌آید و نقاط مختلف آن با استفاده از یک برازش درجه دو به یکدیگر متصل می‌گردند. که نمودار آن به همراه z^2 مربوطه در "شکل 7" نشان داده شده است. مقدار z^2 با استفاده از تحلیل ارتعاشات غیرخطی و مطابق با نمودار "شکل 11" برابر با 0.057 بدست آمده است. در نتیجه به کمک رابطه (1) و با استفاده از مقادیر z^2 و بار کمانش خطی، بار کمانش پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی و با استفاده

جدول 4 فرکانس خطی در بارهای فشاری مختلف

Table 4 Linear frequency in the different compressive loads

فرکانس طبیعی (Hz)				بار فشار محوری (kN)
مود سوم	مود دوم	مود اول	مود چهارم	
535	524	433	740	0
534	522	432	739	2.5
529	517	427	735	5
523	510	418	729	7.5
517	503	410	723	10
511	495	401	717	12.5
504	487	392	710	15
498	479	383	703	17.5
491	471	374	695	20

جدول 5 فرکانس غیرخطی در بارهای فشاری مختلف

Table 5 Nonlinear frequency in the different compressive loads

فرکانس طبیعی (Hz)				بار فشار محوری (kN)
مود سوم	مود دوم	مود اول	مود چهارم	
535	524	433	740	0
534	522	432	739	2.5
529	517	427	735	5
523	510	418	729	7.5
517	503	410	723	10
511	495	401	717	12.5
502	487	392	710	15
496	478	382	702	17.5
489	470	373	694	20

روش مناسبی می‌باشد. در واقع بدون این‌که به سازه موردنظر آسیب جدی وارد شود و یا به‌طور کامل تخریب گردد، می‌توان با استفاده از روش وی‌سی‌تی بار بحرانی کمانش آن سازه را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود.

5-6- تخمین بار کمانش به روش وی‌سی‌تی در بازه‌های مختلف بار

فشاری

با توجه به این‌که دقت پیش‌بینی روش وی‌سی‌تی وابسته به انتخاب بازه‌ی نیروی فشاری می‌باشد، بررسی اثر در نظر گرفتن محدوده‌ی این بازه‌ها بر دقت روش وی‌سی‌تی بسیار مهم می‌باشد. برای پیدا کردن محدوده‌ی مناسب بار فشاری، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فرکانس در بازه‌های مختلف بار فشاری و به کمک روش وی‌سی‌تی به پیش‌بینی بار کمانش می‌پردازیم. از آن‌جا که استفاده از آنالیز ارتعاشات غیرخطی دقت مناسبی ارائه نمود، در این قسمت از اطلاعات به‌دست آمده از این آنالیز استفاده می‌کنیم. با در نظر گرفتن بازه‌های فشاری مختلف از 31 درصد بار کمانش تجربی تا 93 درصد آن، مقادیر بار کمانش پیش‌بینی‌شده به روش وی‌سی‌تی و با استفاده از شبیه‌سازی ارتعاشات غیرخطی به‌دست آمده و در جدول 7 ارائه شده است. در ادامه نتایج به‌دست آمده با بار کمانش تجربی مقایسه شده است. در نظر گرفتن بازه‌ی فشاری تا 31 درصد و 46 درصد بار کمانش تجربی خطایی بیشتر از 20 درصد دارد و قابل قبول نیست. بازه‌ی فشاری 62 درصد خطایی در حدود 17 درصد بار کمانش تجربی دارد. بازه‌ی فشاری 93 درصد بار کمانش تجربی، خطای کمتر از 5 درصد دارد و بازه‌ی 77 درصد بار کمانش تجربی، خطایی در حدود 7 درصد دارد. بنابراین نتایج در نیروی فشاری بالای 77 درصد نیروی کمانش دارای دقت بالایی می‌باشند. چرا که هم دارای خطای کم و قابل قبولی می‌باشد و هم سازه به کمانش یا حتی در آستانه‌ی کمانش هم نمی‌رسد این در حالی است که در بازه‌ی فشاری 93 درصد، سازه در آستانه کمانش می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بار کمانش بحرانی پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده مشبک با استفاده از روش وی‌سی‌تی مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام شد و تحلیل عددی ارتعاشات خطی و غیرخطی در مقادیر مختلف بار فشارمحوری انجام شده و فرکانس طبیعی در بارگذاری‌های مذکور به‌دست آمد. در مرحله‌ی بعدی بار کمانش خطی به روش تحلیلی و عددی به‌دست آورده شده و مورد مقایسه

جدول 6 مقایسه‌ی نتایج

P_{EXP}	$P_{VCTNonlinear}$	$P_{VCTLinear}$
22.80	22.24	24.15
-	2.7%	5.6%

بار بحرانی کمانش (kN)
درصد اختلاف با بار کمانش تجربی

جدول 7 بررسی اثر بازه‌های فشاری

$\frac{P_{VCTNonlinear} - P_{EXP}}{P_{VCTNonlinear}} \times 100$	$P_{VCTNonlinear}$	$\frac{P}{P_{EXP}} \times 100$
35.9	14.61	31
23.5	17.43	46
16.5	19.03	62
7.0	21.20	77
2.6	22.24	93

بار کمانش به روش وی‌سی‌تی و با استفاده از آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی نمونه‌های ساخته شده، تحت آزمون فشار محوری قرار گرفتند تا مقدار بار کمانش بحرانی تجربی به‌دست آید و با بار کمانش پیش‌بینی شده مقایسه گردند. برای اعمال بار محوری بر روی پوسته‌های ساخته شده از دستگاه یونیورسال شی‌جین دابلیودی‌دابلو 300¹ گردید که توانایی اعمال بار تا 100 KN را دارد. برای اعمال بار به نحو مطلوب از دو صفحه سنگ‌زنی شده که مابین نمونه و فک دستگاه قرار بگیرد، استفاده می‌شود. دستگاه در حالت کنترل جابجایی تنظیم شده و اعمال بار با حرکت سینی متحرک دستگاه صورت می‌گیرد. برای تنظیم و مشخص شدن دقت دستگاه بارگذاری و کالیبره بودن آن در حین بارگذاری از نمونه‌های استاندارد که در دسترس قرار داشت استفاده شد و قبل از شروع بارگذاری حتماً از صحت عملکرد دستگاه اطمینان حاصل شد. بارگذاری محوری تا یافتن بار بحرانی کمانش و خرابی نمونه ادامه می‌یابد. "شکل 12" نمونه قرار گرفته داخل دستگاه تست فشار را قبل و بعد کمانش نشان می‌دهد. بار کمانش تجربی پنج نمونه‌ی ساخته شده با انجام تست فشار محوری بدست می‌آید و مقدار میانگین آن‌ها برابر با 22.80 kN می‌باشد.

5-5- مقایسه نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی بدست آمده

در این قسمت به بررسی کارایی روش وی‌سی‌تی پرداخته می‌شود و نتایج به‌دست آمده از این روش با نتایج به‌دست آمده از تست تجربی مقایسه می‌گردد تا کارایی و بازدهی روش مذکور مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور بار بحرانی کمانش به دست آمده از روش وی‌سی‌تی به کمک آنالیز ارتعاشات خطی را $P_{VCTLinear}$ ، بار بحرانی کمانش به‌دست آمده از روش وی‌سی‌تی به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی را $P_{VCTNonlinear}$ و بار بحرانی کمانش تجربی را P_{EXP} می‌نامیم. همان‌گونه که در جدول 6 مشاهده می‌گردد اختلاف بار بحرانی پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی به کمک آنالیز ارتعاشات خطی با بار کمانش بحرانی تجربی 5.6% می‌باشد.

همان‌گونه که در جدول 6 مشاهده می‌شود اختلاف بار بحرانی پیش‌بینی شده به روش وی‌سی‌تی به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی با بار کمانش بحرانی تجربی 2.70% می‌باشد که دیده می‌شود مقدار بسیار اندکی می‌باشد. بنابراین مشاهده شد که روش وی‌سی‌تی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش



Fig. 12 Specimen before and after buckling

شکل 12 نمونه قبل و بعد کمانش

¹ Shijin wdw.300e

- shells under cyclic axial loading and unloading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 5, pp. 440-445, 2011 .
- [5] G. Rahimi, M. Zandi, S. Rasouli, Analysis of the effect of stiffener profile on buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 198-203, 2013 .
- [6] M. Hemmatnezhad, G. Rahimi, R. Ansari, On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells, *Acta Mechanica*, Vol. 225, No. 2, pp. 609, 2014 .
- [7] M. Hemmatnezhad, G. Rahimi, M. Tajik, F. Pellicano, Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells, *Composite Structures*, Vol. 120, No. 3, pp. 509-518, 2015.
- [8] A. Talezadehlari, Gh. H. Rahimi, Buckling analysis of stiffened composite cylindrical shell based on the modified smear method, *ModaresMechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 245-256, 2017. (in Persian)
- [9] A. Talezadehlari, Gh. H. Rahimi, The effect of geometrical imperfection on the axial buckling of unstiffened and stiffened composite cylinders with and without cutout, *ModaresMechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 245-256, 2017. (in Persian)
- [10] J. Singer, J. Arbocz, T. Weller, *Buckling Experiments*, Second Edition, pp. 200-500, John Wiley & Sons, 1998 .
- [11] C. Hühne, R. Zimmermann, R. Rolfes, B. Geier, Sensitivities to geometrical and loading imperfections on buckling of composite cylindrical shells, *Proceedings European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing*, Braunschweig: CNES, pp. 1-12, 1998.
- [12] M. W. Hilburger, M. P. Nemeth, J. H. Starnes, Shell buckling design criteria based on manufacturing imperfection signatures, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 44, No. 3, pp. 654, 2006.
- [13] R. Degenhardt, A. Kling, A. Bethge, J. Orf, L. Kärgler, R. Zimmermann, K. Rohwer, A. Calvi, Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 8, pp. 1939-1946, 2010.
- [14] H. Abramovich, D. Govich, A. Grunwald, Buckling prediction of panels using the vibration correlation technique, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 78, No. 1, pp. 62-73, 2015.
- [15] E. Jansen, H. Abramovich, R. Rolfes, The direct prediction of buckling loads of shells under axial compression using VCT-towards an upgraded approach, *29th congress on the International Council of the Aeronautical Science*, St. Petersburg: Taylor & Francis, pp. 1-9, 2014.
- [16] M. Souza, W. Fok, A. Walker, Review of experimental techniques for thin-walled structures liable to buckling: neutral and unstable buckling, *Experimental Techniques*, Vol. 7, No. 9, pp. 21-25, 1983.
- [17] M. Souza, L. Assaid, A new technique for the prediction of buckling loads from nondestructive vibration tests, *Experimental Mechanics*, Vol. 31, No. 2, pp. 93-97, 1991.
- [18] M. A. Arbelo, S. F. de Almeida, M. V. Donadon, S. R. Rett, R. Degenhardt, S. G. Castro, K. Kalnins, O. Ozoliņš, Vibration correlation technique for the estimation of real boundary conditions and buckling load of unstiffened plates and cylindrical shells, *Thin-Walled Structures*, Vol. 79, No. 2, pp. 119-128, 2014 .
- [19] M. A. Arbelo, K. Kalnins, O. Ozoliņš, E. Skukis, S. G. Castro, R. Degenhardt, Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using a vibration correlation technique, *Thin-Walled Structures*, Vol. 94, No. 3, pp. 273-279, 2015.
- [20] C. A. E. Abaqus, *User's manual, Abaqus Anal. user's Man.*, 2016.
- [21] American Society for Testing and Materials, *ASTM D 2256 Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*. Vol. 1, pp.1-12, 2010.
- [22] D. ASTM, 638-03: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *Current edition approved Apr*, Vol. 1, pp.1-16, 2008 .
- [23] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics: Second Edition*, pp. 50-200, CRC press, 2016 .

قرار گرفته شد. سپس به کمک روش وی‌سی‌تی بار بحرانی کمانش با استفاده از آنالیز ارتعاشات خطی و غیرخطی انجام شده، به‌دست آمد. در نهایت برای بررسی و صحت‌سنجی نتایج پیش‌بینی شده نمونه‌های تجربی ساخته شدند و تحت آزمایش فشار قرار گرفتند. به‌طورکلی نتایج به‌دست آمده در این تحقیق عبارتند از:

- 1- بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش وی‌سی‌تی و به کمک آنالیز ارتعاشات خطی 24.15 کیلو نیوتن به‌دست آورده شد. همچنین بار کمانش تجربی به‌دست آمده برابر 22.80 کیلو نیوتن به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، اختلاف نتایج پیش‌بینی شده وی‌سی‌تی به کمک آنالیز ارتعاشات خطی با نتایج تجربی برابر 5.6% درصد می‌باشد. با توجه به این مطلب که نمونه‌های ساخته شده به‌صورت ایده‌آل نیستند و دارای عیوب و نقص‌های هندسی می‌باشند، قابل درک است.
- 2- بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش وی‌سی‌تی و به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی 22.24 کیلو نیوتن به‌دست آورده شد. اختلاف نتایج پیش‌بینی شده وی‌سی‌تی به کمک آنالیز ارتعاشات غیرخطی با نتایج تجربی برابر 2.7% درصد می‌باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش وی‌سی‌تی برای پیش‌بینی نتایج با دقت بسیار بالا برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده می‌باشد.
- 3- روش وی‌سی‌تی روش مناسبی برای پیش‌بینی بار کمانش بحرانی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده می‌باشد و بدون ناپایداری، خرابی و شکست سازه قادر به پیش‌بینی بار بحرانی کمانش می‌باشد. این روش در بازه‌ی تغییرات فشاری مساوی یا بزرگتر از 70 درصد بار تجربی، می‌تواند نتایجی با دقت بالا و خطای کمتر از 10 درصد، برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده به دست آورد.

7- مراجع

- [1] N. Jaunky, N. F. Knight, D. R. Ambur, Formulation of an improved smeared stiffener theory for buckling analysis of grid-stiffened composite panels, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 519-526, 1996 .
- [2] S. Kidane, G. Li, J. Helms, S. S. Pang, E. Woldeesenbet, Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-9, 2003 .
- [3] M. Yazdani, G. Rahimi, The effects of helical ribs' number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No. 17, pp. 2568-2575, 2010 .
- [4] M. Yazdani, G. Rahimi, The behavior of GFRP-stiffened and-unstiffened