



پیش‌بینی تجربی بار کمانش ورق کامپوزیتی مستطیلی چندلایه دارای تورق در عرض با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی

پوریا اعظمی گوگرچین¹، غلامحسین رحیمی^{2*}، محمد سجاد گازر³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

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

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

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/09/23

پذیرش: 98/05/12

کلیدواژگان:

کمانش

روش همبستگی ارتعاشی

ورق کامپوزیت

تورق

چکیده

از جمله پراهمیت‌ترین تحلیل‌هایی که در زمان طراحی سازه‌های کامپوزیتی صورت می‌گیرد، تحلیل پایداری آن‌ها تحت بار محوری یا تحلیل رفتار کمانشی است. روش همبستگی ارتعاشی از دقیق‌ترین روش‌های تعیین بار کمانش سازه به صورت غیرمخرب است. روش همبستگی ارتعاشی یک روش غیرمخرب مبتنی بر تحلیل مودال است که با اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی سازه تحت بارهای مختلف محوری به پیش‌بینی بار کمانش سازه می‌پردازد. یکی از متداول‌ترین آسیب‌هایی که در زمان ساخت و یا در زمان سرویس ممکن است به سراغ کامپوزیت‌ها بیاید، لایه‌لایه شدگی این مواد بوده، که با عنوان تورق مطرح می‌گردد. بنابراین بررسی کمانش سازه‌های مرکب دارای آسیب تورق از اهمیت بالایی برخوردار است که در این مطالعه سعی شده است که به بررسی تجربی این پدیده به کمک روش غیرمخرب همبستگی ارتعاشی و مقایسه آن با نتایج آزمون مخرب کمانش، به صورت تجربی، پرداخته شود. در واقع، این مقاله قابلیت اعمال روش همبستگی ارتعاشی بر سازه‌های دارای آسیب را بررسی می‌کند. برای رسیدن به این هدف ورق‌های کامپوزیتی مستطیلی دارای تورق سرتاسری در عرض به کمک روش تزریق رزین به قالب به کمک خلا ساخته شد. هریک از نمونه‌ها تحت آزمون کمانش مخرب قرار گرفت. سپس به منظور بررسی کارایی روش همبستگی ارتعاشی، آزمون مودال تجربی به منظور تعیین فرکانس طبیعی سازه در بارهای فشاری مختلف انجام گرفت. نتایج نشانگر آن‌اند که روش همبستگی ارتعاشی دقت بسیار خوبی در تعیین بار کمانش ورق کامپوزیتی دارای تورق داشته و درصد اختلاف کمتر از 8 درصد میان نتایج آزمون مخرب و روش غیرمخرب همبستگی ارتعاشی دال بر این موضوع است.

Experimental prediction of buckling load of rectangular composite plate with through-the-width delamination using nondestructive vibration correlation technique

Pouria Azami-Googarchin, Gholam-hossein Rahimi*, Mohammad Sajad Gazor

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

* P.O.B. 141115-111, Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

Keywords

Buckling
Vibration Correlation
Technique
Composite Plate
Delamination

Abstract

One of the most important analysis during designing composite structures is its stability under compressive loads or buckling behavior analysis. Vibration correlation technique is one of the most accurate method to determine buckling load of structures non-destructively. The vibration correlation technique is a non-destructive method based on a modal analysis which predicts the buckling load of the structure by means of measuring the natural frequencies under different loads. One of the most common damages occurring to composites during manufacturing or in-service is debonding between layers known as delamination. Consequently, investigation of buckling of delaminated structures is in a great importance and in this study has tried to cover this issue experimentally using non-destructive vibration correlation technique and comparing its results with common destructive buckling tests. In fact, this paper investigates applicability of applying VCT on damaged structures. In order to reach to this goal, rectangular composite plates with through-the-width delamination using VARTM process has been fabricated. The buckling load of each specimen was determined using common destructive buckling test. Consequently, In order to measure the natural frequencies at different loadings, experimental modal analysis was conducted. The results show that the vibration correlation technique has a very good accuracy in determining the buckling load of the delaminated composite plate and the difference percentage between destructive tests results and the non-destructive vibration correlation technique results which is less than 8% approves it.

1- مقدمه

نسب به مواد ایزوتروپ دارند. وجود آسیب در سازه‌های مرکب باعث کاهش چشم‌گیر خواص آن‌ها می‌شود و در نتیجه این سازه‌ها در باری کمتر، پایداری خود را از دست می‌دهند. هرجدایی بین دو لایه مجاور در یک لایه چینی تورق

مواد مرکب به دلیل داشتن خواص متفاوت در جهات مختلف، لایه‌لایه بودن، استفاده از چند ماده در ساخت آن‌ها مکانیسم‌های خرابی بسیار متنوع‌تری

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Azami-Googarchin, P. Rahimi, G.H. and Gazor, M.S., "Experimental prediction of buckling load of rectangular composite plate with through-the-width delamination using nondestructive vibration correlation technique", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No.7, pp. 813-822, 2020.

جوهاسز و همکارش [4] به بررسی اثر تورق بر بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی پرداختند. ورق کامپوزیتی به کار گرفته شده یک ورق ارتوتروپیک چهار لایه دارای تورق سرتاسری در عرض بود. در قسمت بدون تورق فرض شده است که اتصال چسبی کامل بین لایه‌ها وجود دارد و گسترش ترک در طول بارگذاری روی نمی‌دهد.

اثر تورق چندتایی بر رفتار فشاری، کششی، پیچشی و کمانشی کامپوزیت شیشه اپوکسی توسط اسلان و همکارش [5] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها مطالعه خود را روی ورق کامپوزیتی $s_{45^\circ/0^\circ/2/-45^\circ/90^\circ/2}$ که با استفاده از روش لایه چینی دستی ساخته و تورق مصنوعی روی آن ایجاد کرده بودند انجام دادند. مطالعه صورت گرفته به‌صورت تجربی روی موارد ذکر شده و تورق‌هایی با اشکال دایروی، دمبلی شکل و سرتاسری در عرض صورت پذیرفت.

کاهیا [6] به بررسی کمانش ورق‌های کامپوزیتی چندلایه و تیرهای ساندویچی با استفاده از روش المان محدود پرداخت. وی در پژوهش خود از ایجاد تورق و لغزش بین لایه‌ها صرف‌نظر کرده و تغییر شکل برشی را با توجه به تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول لحاظ نموده است.

زُر [2] به بررسی آثار تورق مربعی بر رفتار کمانش ورق کامپوزیتی چندلایه دارای سوراخ مربعی با استفاده از تحلیلی المان محدود سه‌بعدی پرداخت. در این بررسی که به‌صورت عددی انجام شده است، ابتدا کمانش ورق سالم به‌صورت عددی صورت گرفت و نتایج با مقادیر به‌دست‌آمده از روابط تئوری مقایسه گردید. در محله‌ی بعدی تورق به مدل عددی المان محدود نرم‌افزار انسیس ² اعمال گردید.

جین و همکارش [7] ارتعاشات و کمانش تیر-ورق کامپوزیتی چندلایه دارای تورق چندتایی تحت بارمحوری را با دو روش عددی بررسی کردند. سوماسو [8]، به بررسی تحلیلی و تجربی اثرات تورق لبه آزاد بر کمانش ورق کامپوزیتی مستطیلی با شرایط مرزی گیردار در لبه‌های تحت بار و تکیه‌گاه ساده در لبه فاقد بار و تورق پرداخت.

الکساندر [9] به بررسی رابطه بین بار کمانش و فرکانس طبیعی سازه پرداخت. وی ضمن بیان شباهت‌های موجود بین تئوری‌های مطرح برای تعیین بار کمانش و فرکانس‌های اصلی در هنگام بررسی خطی سازه به بررسی این رابطه در مورد یک قاب چندطبقه و همچنین یک ستون به‌صورت المان محدود و ساده‌سازی‌هایی به‌صورت در نظر گرفتن سیستم ممتد به‌صورت یک سیستم چند درجه آزادی (درجات آزادی برابر با تعداد طبقات) پرداخت.

در سال 2007 و 2008 سوکاجیت و همکارش [10,11] با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی به تعیین بار کمانش ورق‌های مستطیلی پرداختند. آن‌ها ابتدا با استفاده از تئوری‌های کمانش و ارتعاشات ورق همگن آلومینیومی و با استفاده از روش ریتز و به‌کارگیری اصل همپلتون بارهای کمانش را به‌صورت مستقیم به دست آورده و سپس از روش تحلیل ارتعاشی سازه فرکانس طبیعی را در بارهای مختلف محاسبه کردند و نتایج به‌دست‌آمده را با یکدیگر مقایسه کردند.

یانسن و همکاران [12] با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی بار کمانش پوسته‌ها را پیش‌بینی کردند. در این پژوهش نویسنده در تکمیل کار قبلی خویش یک روش نیمه تجربی از روش همبستگی ارتعاشی را برای پوسته استوانه‌ای بکار گرفته است. آن‌ها همچنین این روش را به کمک دو روش نیمه‌تحلیلی نیز حل کرده‌اند.

نامیده می‌شود. تورق یا لایه لایه شدن یکی از متداول‌ترین نوع آسیب در سازه‌های مرکب است که به طور گسترده در این سازه‌ها رخ می‌دهد و غیرقابل‌اجتناب است. یک تورق زمانی اتفاق می‌افتد که یک نیروی خارج از صفحه باعث ایجاد تنش‌های بین لایه‌های موضعی شود که از مقاومت لایه‌نازک ماتریس بین لایه‌ها بیشتر باشد. عدم برابری نسبت‌های پواسون، نسبت کرنش‌های محوری درون صفحه به برشی خارج از صفحه می‌تواند سبب تنش‌های خارج از صفحه شود. به‌علاوه تورق می‌تواند در نتیجه سایر واماندگی‌های موضعی مانند ترک‌های ماتریسی رخ دهد [1]. همچنین؛ از جمله پراهمیت‌ترین تحلیل‌هایی که در زمان طراحی مواد مرکب صورت می‌گیرد، تحلیل پایداری آن‌ها تحت بارمحوری است، که با عنوان کمانش شناخته می‌شود. بنابراین بررسی کمانش سازه‌های مرکب دارای آسیب تورق از اهمیت بالایی برخوردار است

به علت کاهش مقاومت فشاری سازه در اثر تورق، بار کمانش و همچنین حالت کمانش دچار دگرگونی می‌شود. از جمله حالات کمانش سازه ورق دارای تورق می‌توان به مواد زیر اشاره کرد [2]. شماتیکی از این حالات در شکل 1 آمده است.

- 1- کمانش کلی متقارن
- 2- کمانش کلی نامتقارن
- 3- کمانش موضعی
- 4- ترکیبی از حالات بالا

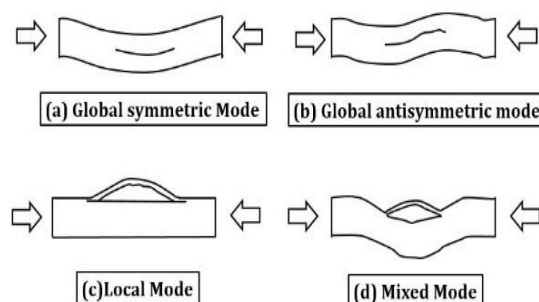


Fig. 1 Different mode of buckling of a delaminated composite plate
شکل 1 حالات مختلف کمانش ورق کامپوزیت چندلایه دارای تورق [2]

روش همبستگی ارتعاشی که درواقع ارتباط مشخصات ارتعاشی به بارهای کمانش است، در ابتدای قرن بیستم توسط سامرفلد [3] مورد استفاده قرار گرفت. وی مشاهده کرد با افزایش جرم متصل به انتهای آزاد یک ستون یک سر آزاد و یک سر گیردار فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد. آزمون مودال تکنیکی تجربی برای به دست آوردن مدل مودال یک سیستم ارتعاشی خطی نامتغیر با زمان است. مبنای تئوری این تکنیک بر اساس رابطه بین پاسخ ارتعاشی در یک نقطه از سازه با تحریک در همان نقطه و یا نقطه‌ای دیگر، به‌صورت تابعی از فرکانس تحریک است. این رابطه، که اغلب به‌صورت یک تابع ریاضی مختلط هست، تابع پاسخ فرکانسی¹ و یا به‌طور خلاصه FRF نامیده می‌شود.

² Ansys

¹ Frequency response function

استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و در بارهای فشاری مختلف انجام شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از روش تحلیلی ریلی ریتز و عددی، بار بحرانی- کمانش خطی سازه مذکور محاسبه شد. سپس به کمک روش VCT بار بحرانی کمانش غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی پیش‌بینی شد. در ادامه و برای صحت سنجی نتایج روش VCT، پنج پوسته‌ی کامپوزیتی مشابه و با شرایط یکسان و با استفاده از روش پیچش 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 پیش‌بینی‌شده به روش VCT با بار بحرانی کمانش به دست‌آمده از آزمایش تجربی کمتر از 3 درصد هست که این موضوع دال بر مناسب بودن روش VCT برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با دقت بسیار بالا برای پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی است. آن‌ها [18] همچنین، به پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه مشابه با پژوهش قبل، روش همبستگی ارتعاشی را روی استوانه تقویت‌شده با ریب به دو روش تجربی و عددی اعمال کردند.

خورشیدی و همکاران [19] به بررسی ارتعاشات غیرخطی ورق‌های کامپوزیتی چند لایه با استفاده از تئوری‌های مختلف غیر خطی پرداختند. آن‌ها پاسخ غیرخطی را نسبت به تحریک هارمونیک در همسایگی فرکانس مورد بررسی قرار دادند؛ همچنین این مسئله را شرایط مرزی مختلف حل و نتایج را مقایسه کردند. آن‌ها در مطالعات دیگری به بررسی ارتعاشات آزاد ورق کامپوزیتی چند لایه [20] و ورق کامپوزیتی مدرج [21] زمانی که قسمتی از آن در تماس با سیال محدود قرار دارد، پرداختند.

در این مقاله به منظور اعتبار سنجی روش همبستگی ارتعاشی در مورد سازه‌های دارای آسیب، با استفاده از روش غیر مخرب همبستگی ارتعاشی به پیش‌بینی بار کمانش ورق کامپوزیتی چند لایه به صورت تجربی پرداخته می‌شود و با نتایج آزمون مخرب مقایسه می‌شود. در دامنه دانش نگارنده تاکنون در زمینه اعمال روش غیر مخرب همبستگی ارتعاشی روی سازه دارای آسیب مطالعه‌ای صورت نگرفته است. در روند این مقاله، ابتدا روش و نحوه ساخت نمونه‌ها با استفاده از روش تزریق رزین به قالب به کمک خلا بیان می‌شود. سپس شرح آزمون مودال نمونه‌ها تحت فشار محوری بیان می‌گردد. بعد از آن نتایج دو آزمون مخرب و غیر مخرب جهت بررسی کارایی روش همبستگی ارتعاشی مقایسه خواهند شد.

2- آزمون کمانش مخرب و غیرمخرب

2-1- ساخت نمونه

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش ورق‌های کامپوزیتی 16 لایه با جهت صفر هستند که به کمک ورق‌های تفلون PTFE در آن‌ها تورق ایجاد شده است. این ورق‌ها از الیاف شیشه ای-گلاس²، به دلیل کاربردهای بسیار زیاد و قیمت مناسب نسبت به سایر الیاف مانند الیاف کربن و رزین اپوکسی با درجه حرارت پخت محیط با استفاده از روش انتقال رزین به قالب تحت خلأ ساخته شده‌اند. الیاف شیشه مورد استفاده درواقع پارچه تک جهته با وزن 200 گرم بر متر مربع هستند؛ همچنین از رزین اپوکسی، با عنوان تجاری ML-506 و هاردنر اپوکسی HA-11 به عنوان ماتریس در ساخت نمونه‌ها استفاده گردید.

آربلو و همکاران [13] با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی به تخمین شرایط مرزی واقعی و بار کمانش ورق‌های ساده و پوسته‌ی استوانه‌ای ساده پرداخته و توانایی‌ها، ظرفیت‌ها و محدودیت‌های این روش را بررسی کرده‌اند. این مطالعه در قالب بررسی تجربی و عددی به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفته است.

چاوز-وارگاسو همکاران [14]، به مطالعه پاسخ دینامیکی و رفتار کمانشی ورق کامپوزیتی پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن که درواقع مقطع ساده‌سازی شده باله هواپیما مسافربری است، پرداختند. یکی از اهداف آن‌ها بررسی ارتباط بین خواص مودال سازه و رفتار کمانشی سازه است که در این اینجا به عنوان روش همبستگی ارتعاشی ذکر گردید. این بررسی در قالب تحلیل المان محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس و یک کار تجربی صورت پذیرفت.

آبراموویچ و همکاران [15] به پیش‌بینی کمانش پل‌ها با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی پرداختند. سازه‌ی مورد بررسی آن‌ها پل‌های دارای انحنا تقویت‌شده است که سه نمونه از آن‌ها با جنس‌های مختلف و ترکیبی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی رفتار پس کمانشی پایدار و غیر پایدار در مورد ورق‌ها و پوسته‌ها، یک پوسته استوانه‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بیشتر کار تجربی صورت گرفته است؛ درحالی که بار کمانش و بار فروپاشی توسط کد المان محدود انسیس و کد نوشته‌شده توسط محققین دیگر به دست آورده شده است. روش ذکرشده در اکثر موارد باری بیشتر از بار کمانش پیش‌بینی می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر تأثیر دادن نقایص هندسی در پاسخ است، برای این منظور رابطه $(1 - \zeta^2)(1 - p)^2 + 1 = f^4$ توسط د. سوزا پیشنهاد شده است که در آن ζ ضریب کوبش¹ است که نویسنده در پژوهش خود به آن اشاره کرده است اما در رسم نتایج مربع فرکانس را برحسب بار اعمالی رسم نموده است. در انتها یک راهنما جهت اعمال روش همبستگی ارتعاشی ارائه شده است.

آربلو و همکاران [16] با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی به تعیین بار پوسته استوانه‌ای به روش‌های تجربی و عددی پرداختند. در بررسی تجربی سه پوسته استوانه‌ای ساخته شد و تا کمانش تحت فشار قرار گرفت. به دلیل طراحی به کاررفته در نمونه‌ها کمانش سازه در ناحیه الاستیک رخ داد و به نمونه آسیبی نرسید؛ در قسمت دوم آزمون تجربی با استفاده از لیزر ارتعاش سنج فرکانس طبیعی اول و شکل بود، استخراج گردید.

در این پژوهش نویسنده به جای استفاده از نمودار $(1 - P^2)$ برحسب $(1 - f^4)$ بنا به پیشنهاد محقق از نمودار $(1 - P^2)$ برحسب $(1 - f^2)$ استفاده کرده است در این صورت می‌توان با برازش منحنی درجه دوم نقاط به دست‌آمده را به هم متصل کرد؛ همچنین مقدار کمینه $(1 - P^2)$ تقریبی از مربع ζ^2 که ضریب افت بار است را برای استوانه دارای نقص ارائه می‌کند،

با استفاده از این روش بار کمانش را می‌توان طبق رابطه $P_{imperfect} = P_{cr}(1 - \sqrt{\zeta^2})$ بیان کرد. به منظور مدل‌سازی دقیق در نرم‌افزار المان محدود و تأثیر دادن نقایص هندسی و نقایص ضخامت به ترتیب از اسکن لیزر و اسکن اولتراسونیک استفاده شد.

شاهقلیان و رحیمی [17] به پیش‌بینی بار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با استفاده از روش VCT پرداختند. برای این منظور در ابتدا تحلیل ارتعاشات خطی و غیرخطی پوسته‌ی استوانه‌ای کامپوزیتی با

¹ Knock-down

² E-Glass

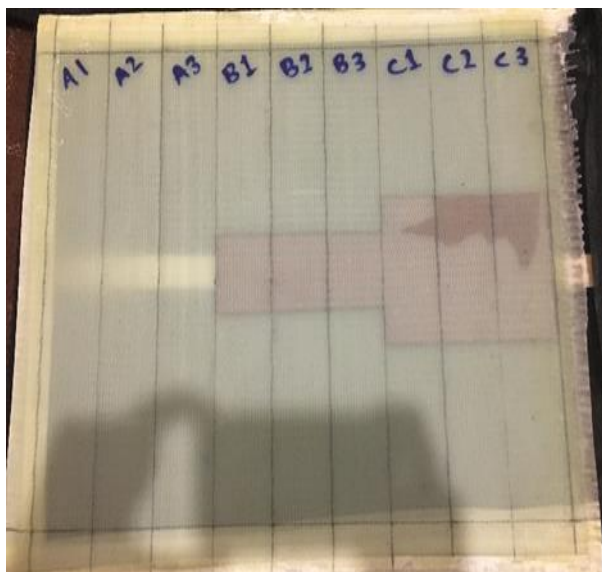


Fig. 4 Specimen after curing

شکل 4 نمونه بعد از پخت

2-2- مشخصات نمونه‌ها

به‌منظور بررسی اثرات مختلف جدایی لایه‌ها یا تورق بر روی بار کمانش بحرانی تعدادی نمونه به روش ذکرشده ساخته شده است.

برای بررسی اثر طول تورق نمونه‌های A، B، C و D با طول تورق به ترتیب 0، 50، 100 و 150 میلی‌متر و از هر نمونه به تعداد سه عدد ساخته شد و روی آن‌ها آزمون‌های کمانش و مودال تحت فشار و بدون فشار انجام گرفت.

مشخصات هندسی نمونه‌های ساخته شده در شکل 5 نمایش داده شده است.

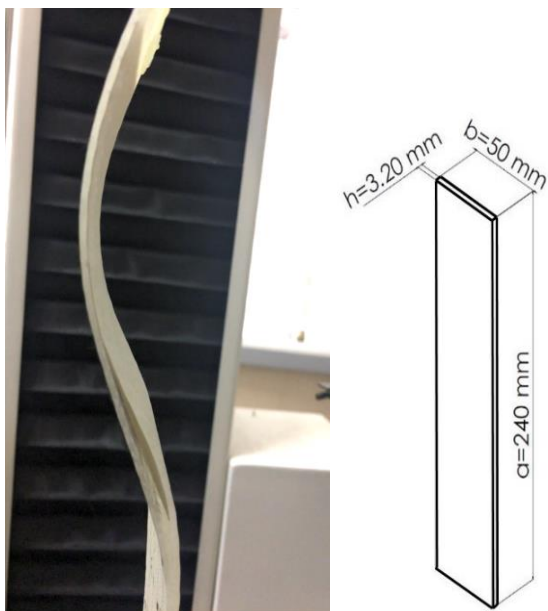


Fig. 5 Specimen dimensions and delamination

شکل 5 ابعاد هندسی نمونه‌ها و شکل تورق

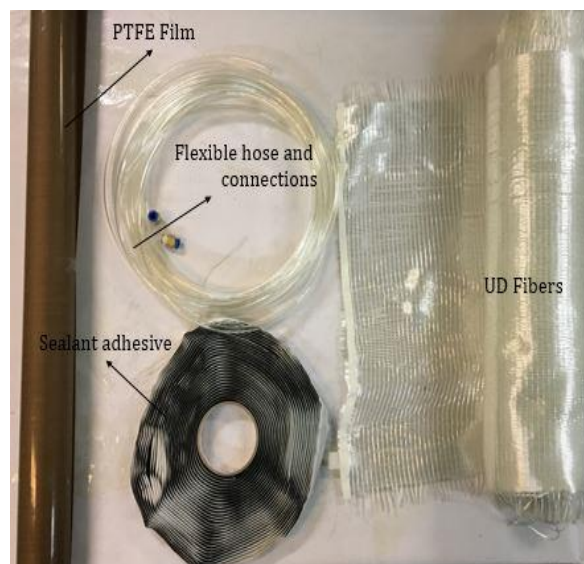


Fig. 2 Material needed to manufacture specimens

شکل 2 مواد اولیه جهت ساخت نمونه‌ها

از آنجاکه هدف این پژوهش بررسی نمونه دارای خرابی (تورق) است، روشی که آسیب ساخت کمتری به نمونه وارد کند باید انتخاب گردد و به دلیل آن‌که در روش لایه چینی دستی برای رسیدن به تضمین این امر نیاز به مهارت بسیار بالا است، از روش انتقال رزین به قالب تحت خلأ¹ استفاده شود. به دلیل آنکه هندسه نمونه‌ها ورق‌های مستطیلی هستند، نیازی به قالب خاصی نیست و می‌توان از یک قطعه شیشه به‌عنوان قالب استفاده نمود. مواد اولیه مورد نیاز در شکل 2، در شکل 3 فرایند ساخت و در شکل 4 نمونه ساخته شده مشاهده می‌شود.



Fig. 3 Specimen manufacturing process

شکل 3 فرایند ساخت نمونه‌ها

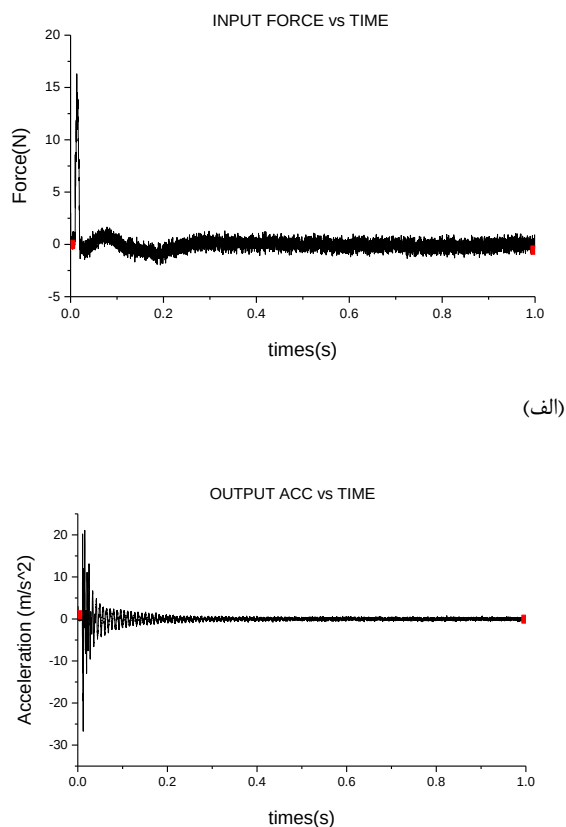
¹ VARTM



Fig. 8 Analyzer, accelerometer and excitation hammer

شکل 8 آنالایزر، شتاب سنج و چکش

دستگاه آنالایزر از طریق اندازه‌گیری ولتاژ خروجی تجهیزات اندازه‌گیری داده‌های آنالوگ را به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌کند و در کامپیوتر در قالب اطلاعات شتاب و نیرو ارائه می‌کند. شکل 9 یک مثال از اطلاعات به‌دست‌آمده از آنالایزر را نمایش می‌دهد.



(الف)

(ب)

Fig. 9 Data obtained from analyzer (a) Input, including force applied by hammer (b) Output, including acceleration measured by accelerometer sensor

شکل 9 اطلاعات به‌دست‌آمده از آنالایزر (الف) ورودی، شامل اطلاعات نیروی اعمالی توسط چکش، (ب) خروجی، شامل شتاب اندازه‌گیری شده توسط حسگر شتاب

3-2- آزمون مودال تجربی

به‌منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی یک سازه به‌صورت تجربی از آزمون مودال تجربی استفاده می‌شود. برای استفاده از روش همبستگی ارتعاشی، بایستی فرکانس‌های طبیعی سازه مکانیکی را هنگامی که تحت بارمحوری قرار گرفته است، به دست آورد (شکل 6).

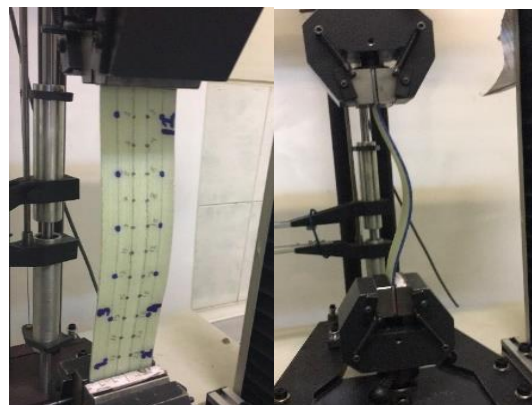


Fig. 6 Boundary conditions and points of excitation

شکل 6 شرایط مرزی گیردار ایجادشده و نقاط تحریک

تحریک سازه، به دلیل کوچک بودن نمونه‌ها و برای جلوگیری از وارد شدن اثرات ناخواسته جرم و اثرات ناشی از عدم نصب صحیح آن، توسط چکش صورت گرفته است.



Fig. 7 Attaching the accelerometer to the specimen

شکل 7 اتصال شتاب سنج به نمونه

برای جلوگیری از اثرات جرم اضافی تنها از یک شتاب سنج PCB که دارای دقت بالا و وزن کم است استفاده گردیده است. برای اتصال آن از چسب حرارتی صنعتی استفاده گردید تا سفتی لازم جهت فراهم‌سازی شرایط موردنیاز اندازه‌گیری فرکانس را داشته باشد. هر مقداری که سفتی اتصال کاهش یابد دامنه فرکانسی قابل‌اندازه‌گیری توسط ترانس‌دیوسر کاهش می‌یابد (شکل 7). برای ثبت اطلاعات تحریک چکش و پاسخ شتاب سنج از یک آنالایزر^۱ استفاده می‌شود. مجموعه آنالایزر و تجهیزات مورد استفاده در شکل 8 نشان داده شده است.

^۱ Analyzer

جدول 1 بار کمانش تجربی بی‌بعد نمونه‌ها

Table 1 Specimen non-dimensional experimental buckling load

کد نمونه	بار کمانش نمونه شماره 1	بار کمانش نمونه شماره 2	بار کمانش نمونه شماره 3	میانگین بار کمانش
	$\bar{N}_x = N_x \frac{a^2}{E_2 t^3}$	$\bar{N}_x = N_x \frac{a^2}{E_2 t^3}$	$\bar{N}_x = N_x \frac{a^2}{E_2 t^3}$	$\bar{N}_x = N_x \frac{a^2}{E_2 t^3}$
A	5.788×10^{-6}	5.497×10^{-6}	5.216×10^{-6}	5.500×10^{-6}
B	5.196×10^{-6}	5.282×10^{-6}	5.283×10^{-6}	5.254×10^{-6}
C	3.491×10^{-6}	3.495×10^{-6}	3.837×10^{-6}	3.608×10^{-6}
D	2.986×10^{-6}	3.006×10^{-6}	2.872×10^{-6}	2.955×10^{-6}

با توجه به جدول 1 مشاهده می‌شود که با افزایش طول تورق بنابر انتظار بار کمانش کاهش یافته است و روند نزولی بار کمانش از تورق صفر در نمونه بدون تورق A تا تورق 150 میلی‌متری در نمونه D کاملاً مشهود است. علت این موضوع را می‌توان کاهش سفتی ماده در اثر ایجاد آسیب دانست؛ هرچه آسیب بزرگ‌تر باشد، سفتی ماده دچار کاهش بیشتری می‌شود و در نتیجه بار کمانش کاهش بیشتری پیدا می‌کند. در مقایسه نمونه فاقد تورق با نمونه‌های دارای تورق می‌توان دید که در طول‌های تورق پایین بار کمانش بحرانی کاهش چشم‌گیری نداشته و بنابراین تورق‌های کوچک تاثیر زیادی روی بار کمانش سازه ندارند، در صورتی که با افزایش طول تورق از مقدار معینی بار کمانش به صورت جهشی کاهش داشته و بار بحرانی کمانش دچار افت شدید می‌گردد.

به‌منظور انجام آزمون مودال تجربی، نمونه‌ها در شرایط دو لبه گیردار و دو لبه آزاد مطابق شکل 14 در دستگاه آزمون کشش و فشار قرار داده شدند. ابتدا در شرایطی که نیروسنج عدد صفر را نشان می‌دهد آزمون مودال انجام گرفت، سپس با حالت کنترل دستی، نیرو اضافه گردید و آزمون مودال تا حدود 70 درصد بار کمانش در چندین بار مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمون‌ها به نمودار تابع پاسخ فرکانسی تبدیل و به کمک آن فرکانس طبیعی نمونه در هر بار محاسبه گردید. دیده می‌شود که با افزایش نیرو فرکانس کمتر شده است که با تئوری مسئله که در ادامه بیان شده است، کاملاً تطبیق دارد. در جدول 2 مقادیر اولین فرکانس طبیعی در هر بار قابل مشاهده است.

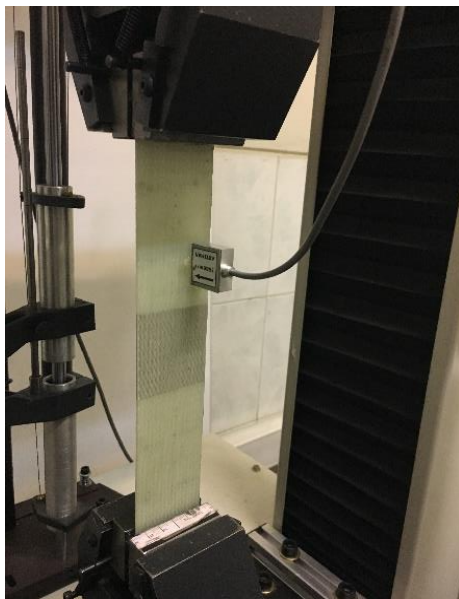


Fig. 11 Boundary conditions of the specimen during experimental modal test under compression and without compression

شکل 11 شرایط مرزی نمونه هنگام آزمون مودال تجربی در حالت بدون فشار و تحت فشار محوری

از اطلاعات به‌دست آمده می‌توان نمودار تابع پاسخ فرکانسی، که درواقع نسبت خروجی به ورودی در میدان فرکانس است را می‌توان استخراج نمود (شکل 10).

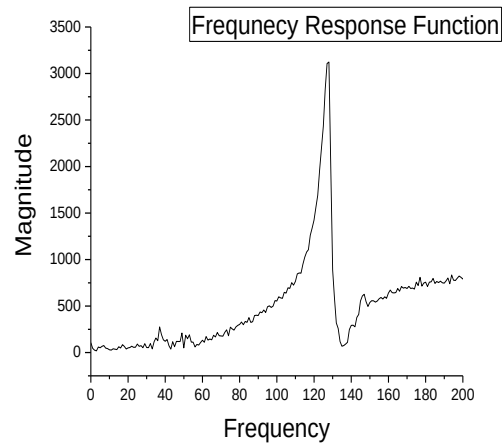


Fig. 10 Frequency response function obtained from analyzer data

شکل 10 تابع پاسخ فرکانسی به‌دست آمده از اطلاعات آنالایزر

2-4- آزمون کمانش

برای صحت سنجی نتایج به‌دست آمده از روش همبستگی ارتعاشی لازم است بار کمانش تجربی اندازه گرفته شود تا با بار کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از این روش مقایسه گردد. بنابراین نمونه‌های ساخته شده، تحت آزمون فشار محوری قرار گرفتند تا مقدار بار کمانش بحرانی تجربی به دست آید و با بار کمانش پیش‌بینی شده مقایسه گردند. برای اعمال نیروی محوری از دستگاه مذکور استفاده گردید.

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 و بارگذاری محوری تا یافتن بار بحرانی کمانش و خرابی نمونه ادامه یافت.

3- نتایج

آزمون کمانش مخرب به‌منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده و کارایی سنجی روش همبستگی ارتعاشی است. نمونه‌های مختلف ساخته شده تحت بار محوری قرار گرفتند و نمودار نیرو - جابجایی آن‌ها به دست آورده شد. با توجه به عدم وجود استاندارد برای نمونه‌های موجود با توجه به استاندارد مربوط به آزمون کمانش مواد مرکب سرعت $2 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ انتخاب گردید. با توجه به وابستگی نتایج آزمون به ابعاد نمونه‌ها به‌منظور مقایسه درست نتایج بهتر است که نتایج در قالب نمودارهای بی‌بعد ارائه شوند؛ برای این منظور از رابطه (1) [22] برای بی‌بعد سازی بار و از تقسیم جابجایی بر طول نمونه‌ها برای بی‌بعد سازی جابجایی استفاده گردید.

$$\bar{N}_x = N_x \frac{a^2}{E_2 t^3} \quad (1)$$

در رابطه (1)، N_x ، a ، E_2 و t به ترتیب عبارت‌اند از بار بر واحد طول، طول نمونه، مدول یانگ در جهت 2 و ضخامت. در جدول 1 بار کمانش به‌دست آمده از نمودارهای نیرو - جابجایی بی‌بعد نمونه‌ها آورده شده است.

با توجه به مطالب ذکرشده در مورد روش همبستگی ارتعاشی و با توجه به [14] برای پیش‌بینی بار کمانش نمونه‌ها نمودار مربع فرکانس بر حسب بار اعمالی را مطابق جدول 2 رسم و یک خط بر آن برازش شده است؛ این نمودار در شکل 13 مشاهده می‌شود.

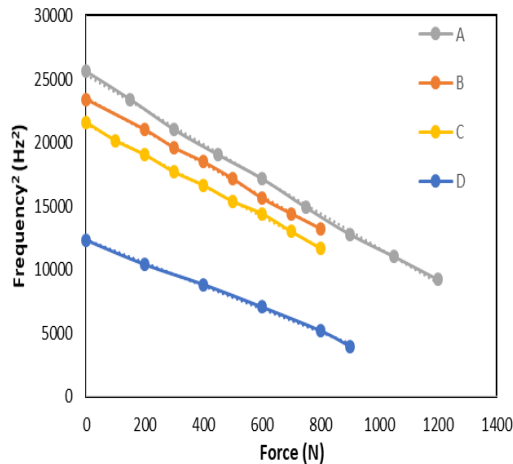


Fig. 13 Frequency squared versus load diagrams for specimen 13 نمودار مربع فرکانس بر حسب بار برای نمونه‌ها

با توجه به نمودار شکل 13 در نقطه‌ای که فرکانس برابر صفر می‌گردد، کمانش اتفاق می‌افتد. بنابراین:

$$y = -13.707x + 25350 \stackrel{y=0}{\Rightarrow} x = P_{VCT} = 1850.35 \text{ N}$$

در جدول 3 بار کمانش سایر نمونه‌ها به کمک خط برازش شده در نمودار شکل 13 آورده شده است.

جدول 3 بار کمانش پیش‌بینی‌شده توسط روش همبستگی ارتعاشی

Table 3 Predicted buckling load by VCT

کد نمونه	معادله خط برازش شده	بار پیش‌بینی شده	بار بی‌بعد پیش‌بینی شده به روش VCT
A	$y = -13.707x + 25350$	1849.42	5.876×10^{-6}
B	$y = -12.908x + 23515$	1821.74	5.422×10^{-6}
C	$y = -12.423x + 21764$	1751.91	3.885×10^{-6}
D	$y = -9.0752x + 12348$	1360.63	3.110×10^{-6}

در جدول 4 نتایج آزمون کمانش مخرب و روش غیر مخرب همبستگی ارتعاشی مقایسه شده و درصد خطا آورده شده است.

جدول 4 مقایسه نتایج تجربی به دو روش مخرب و غیر مخرب

Table 4 Comparison between two experimental destructive and non-destructive methods

کد نمونه	بار کمانش آزمون مخرب	بار پیش‌بینی شده به روش VCT	خطا
A	5.500×10^{-6}	5.876×10^{-6}	6.83%
B	5.254×10^{-6}	5.422×10^{-6}	3.19%
C	3.608×10^{-6}	3.885×10^{-6}	7.67%
D	2.955×10^{-6}	3.110×10^{-6}	5.24%

جدول 2 فرکانس اول به‌دست‌آمده از آزمون مودال تجربی نمونه‌ها تحت بارهای مختلف

Table 2 The first natural frequency obtained from experimental modal tests under different loadings

نمونه A		نمونه B		نمونه C		نمونه D	
بار	فرکانس (Hz)	بار	فرکانس (Hz)	بار	فرکانس (Hz)	بار	فرکانس (Hz)
0	162	0	153	0	153	0	109
150	157	100	151	100	151	200	102
300	143	200	148	200	148	400	94
450	137	300	136.5	300	136.5	600	84
600	131	400	133	400	133	800	62
750	122	500	129	500	129	900	53
900	113	600	123.5	600	123.5	--	--
1050	105	700	118.5	700	118.5	--	--
1200	96	800	113	800	113	--	--

برای پیش‌بینی بار کمانش با استفاده از نتایج تجربی به روش همبستگی ارتعاشی با استفاده از روابط تئوری ورق‌های کلاسیک برای مواد ارتوتروپ متقارن می‌توان رابطه بین فرکانس و بار کمانش را بیان نمود:

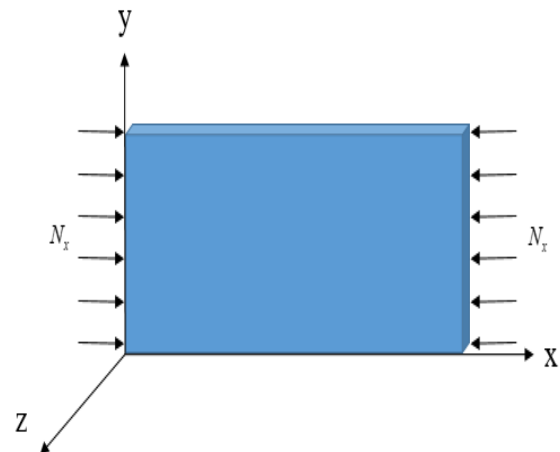


Fig. 12 Rectangular plate under uniaxial loading in the plane

شکل 12 ورق مستطیلی تحت بار تک‌محوری در صفحه

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\bar{N}_x}{D_{11}} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{N_x + \omega^{*2} I_2}{D_{11}} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\omega^{*2} I_0}{D_{11}} w = 0 \quad (3)$$

به‌طوری‌که در آن w جابجایی خارج از صفحه، I_0 ممان اینرسی، D_{11} صلبیت خمشی ورق، $\bar{N}_x$ بار کمانش، N_x بار اعمالی در صفحه و ω^* فرکانس طبیعی در ورق با بار N_x اعمالی در صفحه است.

با استفاده از دو رابطه‌ی (2) و (3) و صرف نظر از برخی عبارات می‌توان به رابطه زیر دست یافت:

$$\left(\frac{\omega^*}{\omega}\right)^2 = 1 - \frac{N_x}{\bar{N}_x} \quad (4)$$

رابطه‌ی (4) به علت ثابت بودن بار کمانش و فرکانس طبیعی ورق بدون بار (ω) بیان می‌کند که ارتباط خطی بین بار اعمالی بر ورق و مربع فرکانس آن برقرار است و این رابطه از شرایط مرزی مستقل است. همچنین نتایج جدول 2 با رابطه (4) قابل توجیه هستند.

گردد، زیرا همانطور که ذکر گردید کاهش فرکانس ناشی از وجود تورق زمانی که سازه تحت بار محوری قرار دارد نیز حفظ می‌شود و با انجام آزمون مودال تجربی هنگامی که سازه تحت بار قرار دارد می‌توان با اطمینان بیشتر از وجود یا عدم وجود تورق در آن بحث نمود.

فهرست علائم

a	طول نمونه (m)
t	ضخامت نمونه (m)
w	جایجایی در جهت عمود بر صفحه (m)
E_2	مدول الاستیک در جهت عمود بر الیاف (Pa)
D	سختی خمشی (N.m)
N_x	بارمحوری اعمالی (N)
$\bar{N}_x$	بارمحوری بی‌بعد
ω	فرکانس (Hz)
ρ	چگالی (kgm-3)

علائم یونانی

6- مراجع

- [1] Kassapoglou, C., "Modeling the Effect of Damage in Composite Structures", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2015.
- [2] Zor, M., Şen, F. and Toygar, M. E., "An Investigation of Square Delamination Effects on the Buckling Behavior of Laminated Composite Plates with a Square Hole by Using Three-Dimensional Fem Analysis" Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 24, No. 11, pp. 1119-1130, 2005.
- [3] Singer, J., Arbocz, J. and Weller, T., "Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures-Volume 2", 2002.
- [4] Juhász, Z. and Szekrényes, A., "The Effect of Delamination on the Critical Buckling Force of Composite Plates: Experiment and Simulation" Composite Structures, Vol. 168, pp. 456-464, 2017.
- [5] Aslan, Z. Z. I. and Daricik, F., "Effects of Multiple Delaminations on the Compressive, Tensile, Flexural, and Buckling Behaviour of E-Glass/Epoxy Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 100, pp. 186-196, 2016.
- [6] Kahya, V., "Buckling Analysis of Laminated Composite and Sandwich Beams by the Finite Element Method" Composites Part B: Engineering, Vol. 91, No. 8, pp. 126-134, 2016.
- [7] Jane, K. C. and Harn, Y. C., "Vibration of Delaminated Beam-Plates with Multiple Delaminations under Axial Forces" Mechanics of Structures and Machines, Vol. 28, No. 1, pp. 49-64, 2000.
- [8] Suemasu, H., Kawauchi, M., Gozu, K., Hayashi, K. and Ishikawa, T., "Effects of a Free Edge Delamination on Buckling of Rectangular Composite Plates with Two Fixed Loading and One Simply-Supported Side Edges" Advanced Composite Materials, Vol. 5, No. 3, pp. 185-200, 1996.
- [9] Alexander, T. A., "The Relationship between the Buckling Load Factor and the Fundamental Frequency of a Structure" in Proceeding of American Society of Civil Engineers, pp. 1-17.

با توجه به جدول 4، ملاحظه می‌گردد که روش همبستگی ارتعاشی با دقت بسیار خوبی قابلیت پیش‌بینی بار کمانش را به صورت تجربی دارا است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درد خطا روش همبستگی ارتعاشی برای نمونه‌های دارای تورق و فاقد تورق کمتر از 8 درصد بوده و این اختلاف دال بر کارایی این روش برای سازه‌های دارای آسیب است.

4- بحث

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش طول تورق، کاهش بار کمانش بحرانی در ورق مشاهده گردید. این امر به دلیل کاهش سفتی ماده به دلیل وجود خرابی بزرگ‌تر و عدم یکپارچگی ماده است. روش همبستگی ارتعاشی با دقت بسیار خوب قادر است تنها با داشتن فرکانس طبیعی سازه در چند بار مختلف بار کمانش سازه را بدون تخریب آن تعیین کند و در تمامی نمونه‌ها درصد تفاوت مقادیر بار کمانش سازه با توجه به جدول 4 با استفاده از روش غیرمخرب در مقایسه با روش مخرب کمتر از 8 درصد است.

5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی که یک روش غیر مخرب ارتعاشی مبتنی بر پارامترهای مودال سازه است، به تخمین تجربی بار کمانش ورق دارای تورق پرداخته شد. اثرات طول تورق مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده با روش انتقال رزین تحت خلأ تحت آزمایش‌های کمانش مخرب و آزمون مودال تجربی واقع شدند و این آزمایش‌ها ارزیابی گردید. هنگامی که سازه‌ای تحت پیش تنش قرار دارد، فرکانس طبیعی آن کاهش پیدا می‌کند که علت آن کاهش سفتی سازه بیان می‌شود؛ مانند سیمی از یک آلت موسیقی که تحت کشش‌های متفاوت صداها و در نتیجه فرکانس‌های مختلفی از خود نشان می‌دهد. آزمون مودال تجربی صورت گرفته نیز مؤید این مطلب است.

با توجه به رفتار ارتعاشی سازه در بعد از کمانش که با افزایش فرکانس مواجه می‌شود، می‌توان در صورت عدم تخریب سازه آزمون مودال تجربی را برای رفتار پس کمانشی سازه مورداستفاده قرارداد.

استفاده از روش همبستگی ارتعاشی علاوه بر سازه‌های مطرح شده تاکنون که همگی سالم بودند، قابلیت استفاده در سازه‌های دارای آسیب را نیز داراست. علت این موضوع را می‌توان تأثیر آسیب‌ها در سفتی سازه و در نتیجه فرکانس طبیعی آن دانست.

با افزایش طول تورق، کاهش بار کمانش بحرانی در ورق مشاهده گردید. این امر به دلیل کاهش سفتی ماده به دلیل وجود خرابی بزرگ‌تر و عدم یکپارچگی ماده است.

از نتایج به دست آمده اثر تورق بر فرکانس طبیعی است. تورق باعث کاهش سفتی ماده شده و در نتیجه باعث کاهش فرکانس طبیعی ماده می‌شود. یکی از روش‌های تشخیص عیب در سازه‌ها استفاده از پارامترهای مودال مانند فرکانس طبیعی است. اما تشخیص وجود تورق به کمک این پارامتر بسیار دشوار است، زیرا کاهش فرکانس در اثر وجود تورق جزئی بوده و نیاز به وجود تجهیزات بسیار دقیق دارد. در این پژوهش ملاحظه گردید که با انجام آزمون مودال تجربی در هنگامی که بارمحوری بر نمونه وارد نشده است، اگرچه فرکانس طبیعی نمونه‌ها بسیار به یکدیگر نزدیک هستند اما برای اطمینان از نتیجه آزمایش می‌توان اندازه‌گیری فرکانس تحت بار انجام شود؛ بنابراین به نظر محقق این روش می‌تواند جهت تشخیص تورق در ورق‌ها و یا سایر سازه‌ها نیز مورداستفاده قرار گیرد تا وجود تورق در سازه با اطمینان بیشتری پیش‌بینی

- [10]Sukajit, P. and Singhatanadgid, P., "Identification of Buckling Load of Thin Plate Using the Vibration Correlation Technique" in Proceeding of 520-525.
- [11]Singhatanadgid, P. and Sukajit, P., "Determination of Buckling Load of Rectangular Plates Using Measured Vibration Data" in Proceeding of 73753Z-73753Z.
- [12]Jansen, E. L., Abramovich, H., Rolfes, R. and Hannover, L. U., "The Direct Prediction of Buckling Loads of Shells under Axial Compression Using Vct - Towards an Upgraded Approach", pp. 1-9.
- [13]Arbelo, M. A., de Almeida, S. F. M., Donadon, M. V., Rett, S. R., Degenhardt, R., Castro, S. G. P., Kalnins, K. and Ozoliņš, O., "Vibration Correlation Technique for the Estimation of Real Boundary Conditions and Buckling Load of Unstiffened Plates and Cylindrical Shells" Thin-Walled Structures, Vol. 79, pp. 119-128, 2014.
- [14]Chaves-Vargas, M., Dafnis, A., Reimerdes, H. G. and Schröder, K. U., "Modal Parameter Identification of a Compression-Loaded Cfrp Stiffened Plate and Correlation with Its Buckling Behaviour" Progress in Aerospace Sciences, Vol. 78, pp. 39-49, 2015.
- [15]Abramovich, H., Govich, D. and Grunwald, A., "Buckling Prediction of Panels Using the Vibration Correlation Technique" Progress in Aerospace Sciences, Vol. 78, pp. 62-73, 2015.
- [16]Arbelo, M. A., Kalnins, K., Ozolins, O., Skukis, E., Castro, S. G. P. and Degenhardt, R., "Experimental and Numerical Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells Using a Vibration Correlation Technique" Thin-Walled Structures, Vol. 94, 2015.
- [17]Shahgholian-Ghahfarokhi, D. and Rahimi, G., "Prediction of the Critical Buckling Load of Composite Cylindrical Shells by Using Vibration Correlation Technique" Composites Science and Technology, Vol. 167, pp. 470-481, 2018.
- [18]Shahgholian-Ghahfarokhi, D. and Rahimi, G., "Buckling Load Prediction of Grid-Stiffened Composite Cylindrical Shells Using the Vibration Correlation Technique" Composites Science and Technology, Vol. 167, No. May, pp. 470-481, 2018.
- [19]Amabili, M., Karazis, K. and Khorshidi, K., "Nonlinear Vibrations of Rectangular Laminated Composite Plates with Different Boundary Conditions" International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol. 11, No. 04, pp. 673-695, 2011.
- [20]Khorshid, K. and Farhadi, S., "Free Vibration Analysis of a Laminated Composite Rectangular Plate in Contact with a Bounded Fluid" Composite Structures, Vol. 104, pp. 176-186, 2013.
- [21]Khorshid, K., "Free Natural Frequency Analysis of an Fg Composite Rectangular Plate Coupled with Fluid Using Rayleigh-Ritz Method" Mechanics of dvanced composite structures, 2014.
- [22]Mohanty, J., Sahu, S. K. and Parhi, P. K., "Parametric Instability of Delaminated Composite Plates Subjected to Periodic in-Plane Loading" JVC/Journal of Vibration and Control, Vol. 21, No. 3, pp. 419-434, 2015.

