



Experimental Analysis of Composite Sandwich Plates Buckling with Lozenge Core Using the Vibration Correlation Technique

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Aghaei-Ruzbahani M.¹ MSc,
Shahgholian-Ghahfarokhi D.¹ MSc,
Rahimi Gh.*¹ PhD

How to cite this article

Aghaei-Ruzbahani M, Shahgholian-Ghahfarokhi D, Rahimi Gh. Experimental Analysis of Composite Sandwich Plates Buckling with Lozenge Core Using the Vibration Correlation Technique. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1399-1408.

¹Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 82883356
Fax: -
rahimi_gh@modares.ac.ir

Article History

Received: May 26, 2019
Accepted: October 12, 2019
ePublished: May 09, 2020

ABSTRACT

Currently, composite structures have many applications in various industries including aerospace, automotive, marine, and petrochemicals. In most of these applications, the structure is under dynamic and static loads and it can cause buckling, vibration, and fatigue. Therefore, the static and dynamic analysis of these structures is essential in order to understand their characteristics, including buckling, natural frequency, and the shape of vibrating modes. One of the most important non-destructive methods for predicting the buckling load of the structure is the vibrational correlation technique (VCT), which is based on frequency variations with the axial load. In this study, an experimental study of the buckling load of composite sandwich plates with lozenge core has been investigated. The hand lay-up method has been used for fabrication of the composite sandwich plates. One of the specimens was used for the modal test. In order to verify the results of the VCT, the buckling load of four specimens was calculated by the experimental buckling test. The error of VCT was 2.1 %. Hence, the efficiency of the VCT for composite sandwich plates with lattice core was confirmed. Also, by investigating the effect of applied load percentage on the accuracy of the VCT, it was found that for the applied load of more than 63% of the buckling load, the accuracy of prediction of the vibrational correlation technique is acceptable.

Keywords Buckling; Vibration Correlation Technique (VCT); Composite Sandwich Plate; Fabrication; Modal Analysis

CITATION LINKS

[1] Effect of stiffness characteristics on the response of composite grid-stiffened ... [2] Buckling of circular, solid and annular plates with an intermediate circular ... [3] Fabrication and testing of composite isogrid stiffened ... [4] Experimental and numerical investigation of the effect of longitudinal and horizontal ribs on flexural behavior of grid ... [5] Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of grid composite ... [6] An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial ... [7] Experimental and numerical investigation of stiffener effects on buckling strength of composite laminates with circular ... [8] Improved manufacturing method and mechanical performances of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich ... [9] Free vibration behaviors of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich ... [10] Free vibration analysis of grid stiffened composite conical ... [11] Experimental and numerical investigation of the free vibration of composite sandwich plates with lattice ... [12] A simple device to illustrate the buckling ... [13] Lateral vibrations as related to structural ... [14] Identification of buckling load of thin plate using the vibration correlation ... [15] Determination of buckling load of rectangular plates using measured vibration ... [16] Buckling prediction of panels using the vibration correlation ... [17] Review of experimental techniques for thin-walled structures liable to buckling: Neutral and unstable ... [18] A new technique for the prediction of buckling loads from nondestructive vibration ... [19] The direct prediction of buckling loads of shells under axial compression using ... [20] Modal parameter identification of a compression-loaded CFRP stiffened plate and ... [21] Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical ... [22] Vibration correlation technique for the estimation of real boundary conditions and ... [23] Experimental nondestructive test for estimation of buckling load on unstiffened ... [24] Experimental test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells by ... [25] Prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using ... [26] Prediction of the critical buckling load of stiffened composite cylindrical shells ... [27] Buckling load prediction of grid-stiffened composite cylindrical shells using the ... [28] Principles of composite material ...

تحلیل تجربی بار کمانش ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی

میلاد آقایی روزبهانی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

داود شاهقلیان قهفرخی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

غلامحسین رحیمی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در حال حاضر سازه‌های کامپوزیتی دارای کاربردهای زیادی در صنایع مختلفی از جمله هوافضا، خودرو، دریایی و پتروشیمی هستند. در اکثر این کاربردها، سازه تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی قرار می‌گیرد و ممکن است دچار کمانش، ارتعاش و خستگی شود. بنابراین تحلیل استاتیکی و دینامیکی این سازه‌ها به منظور شناخت خصوصیات آنها از جمله بار کمانش، فرکانس طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی بسیار ضروری است. یکی از مهم‌ترین روش‌های غیر مخرب برای پیش‌بینی بار کمانش سازه روش همبستگی ارتعاشی است که اساس آن بر پایه تغییرات فرکانس با تغییر بار محوری بر سازه است. در این تحقیق به بررسی تجربی بار کمانش ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک لوزی کامپوزیتی پرداخته شده است. برای ساخت ورق‌های ساندویچی از روش رشته پیچی و لایه چینی دستی استفاده شده است. یکی از نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش مودال قرار گرفته و با روش همبستگی ارتعاشی تجربی بار کمانش سازه محاسبه شده است. در ادامه برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از روش همبستگی ارتعاشی، بار کمانش چهار نمونه از طریق آزمون فشار محوری محاسبه شد. میزان خطا برای پیش‌بینی بار کمانش به کمک روش همبستگی ارتعاشی تجربی ۲/۱٪ به دست آمد و کارایی روش همبستگی ارتعاشی تجربی برای ورق کامپوزیتی مشبک مورد تأیید قرار گرفت. همچنین با بررسی تأثیر بازه بار اعمالی بر دقت روش همبستگی ارتعاشی مشخص شد که به ازای بار اعمالی بیش از ۶۳٪ بار کمانش تجربی، دقت پیش‌بینی روش همبستگی ارتعاشی به مقدار قابل قبول می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: کمانش، رهیافت همبستگی ارتعاشی، ورق کامپوزیتی ساندویچی، ساخت، آنالیز مودال

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۷/۲۰

*نویسنده مسئول: rahimi_gh@modares.ac.ir

مقدمه

پس از گسترده‌ی استفاده از کامپوزیت‌ها به جای فلزات به دلیل خواص بهتر از جمله استحکام و سفتی مناسب نسبت به وزن پایین، برای بهبود بیشتر خواص سازه، سازه‌های تقویت‌شده و کامپوزیتی ساندویچی مورد توجه پژوهش‌گران و مهندسان قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین تحلیل‌های خرابی برای اثبات کارایی سازه‌های کامپوزیتی، تحلیل کمانش سازه است. آزمون فشار محوری برای محاسبه مستقیم بار کمانش سازه یک روش مخرب با هزینه بالا است. یکی از مهم‌ترین روش‌های غیر مخرب برای محاسبه بار کمانش سازه

روش همبستگی ارتعاشی است. مزیت اصلی این روش نسبت به روش مخرب، امکان تکرارپذیری آزمایش و عدم آسیب به سازه است. اساس روش همبستگی ارتعاشی بر پایه تشابه بین شکل مودهای کمانش و ارتعاش و تغییرات فرکانس با تغییر بار محوری اعمالی بر سازه است. این روش علاوه بر تخمین بار کمانش سازه قابلیت تعیین شرایط مرزی واقعی نمونه را دارد.

از اولین تحقیقات صورت گرفته بر روی سازه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده، بررسی اثر سطح مقطع تقویت‌کننده بر روی مقاومت کمانشی ورق توسط آمبور و رفیلد^[۱] است. لار و همکاران^[۲] به بررسی تحلیلی کمانش ورق با ضخامت متغیر پرداختند. کیم^[۳] از روش رشته پیچی به کمک قالب سیلیکونی برای ساخت پوسته استوانه تقویت‌شده استفاده کرد. شاهقلیان و همکاران^[۴] و طحانی و همکاران^[۵] با بررسی تجربی و عددی اثر شکل تقویت‌کننده بر رفتار خمشی ورق تقویت‌شده مشاهده نمودند که سفتی خمشی ویژه به ترتیب برای تقویت‌کننده مربعی، مثلثی و لوزی از بیشترین به کمترین است. طبق این پژوهش اثر تقویت‌کننده طولی در استحکام خمشی ورق مشبک قابل توجه است، اما تقویت‌کننده عرضی تأثیری بر استحکام خمشی ورق مشبک ندارد. یزدانی و همکاران^[۶] تأثیر تجربی شکل و تعداد سلول شبکه بر تحمل بار پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده را بررسی کردند. شجاعی و همکاران^[۷] به بررسی تجربی و عددی بار کمانش ورق کامپوزیتی تقویت‌شده با سوراخ دایره‌ای پرداختند. طبق نتایج آنها، تقویت‌کننده طولی نسبت به تقویت‌کننده دایره‌ای و صفحه‌ای تأثیر بیشتری بر افزایش بار کمانش نمونه دارد. مطالعه کمانش و ارتعاش پوسته استوانه ساندویچی به روش عددی و تجربی توسط چن و همکاران^[۸] و ژانگ و همکاران^[۹] انجام شد. آنها پس از ساخت پوسته ساندویچی مشبک به کمک قالب فلزی و به کمک روش رشته پیچی، نشان دادند که سازه ساندویچی از نظر فرکانسی نسبت به سازه کامپوزیتی ساده مناسب‌تر است و دارای کارایی بیشتری برای سازه‌های فضایی است. زارعی و رحیمی^[۱۰] اثر تغییر زاویه تقویت‌کننده‌ها و پارامترهای هندسی بر روی ارتعاشات آزاد پوسته‌های مخروطی را بررسی کردند. آنها همچنین با روش معادل‌سازی، فرکانس طبیعی پوسته تقویت‌شده را محاسبه نمودند. شاهقلیان و همکاران^[۱۱] به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد ورق‌های کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک پرداختند و با تحلیل پارامتری عددی مشاهده نمودند که ضخامت تقویت‌کننده بیشترین تأثیر را بر افزایش فرکانس سازه خواهد داشت. شاهقلیان و همکاران در پژوهش دیگری با بررسی تجربی و عددی پوسته استوانه کامپوزیتی ساندویچی مشاهده نمودند که شرایط مرزی و ضخامت بیشترین تأثیر را بر فرکانس پوسته استوانه دارند و فرکانس پوسته استوانه ساندویچی در حالت شرط مرزی گیردار، نسبت به پوسته استوانه ساده، ۳۴٪ بیشتر است.

از جمله اولین تحقیقات صورت گرفته بر روی روش همبستگی ارتعاشی، توسط سامرفیلد^[۱۲] صورت گرفت؛ سامرفیلد کاهش فرکانس با افزایش جرم به انتهای ستون را مشاهده نمود. در ادامه

را نشان می‌داد. همچنین برای صحت‌سنجی روش همبستگی ارتعاشی بر پایه نتایج عددی برای پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت‌شده، در حالت آنالیز ارتعاش خطی ۵/۶٪ خطا و در آنالیز ارتعاش غیرخطی ۲/۷٪ خطا را مشاهده نمودند. *شاهقلیان و رحیمی* [27] با هر دو روش عددی و تجربی به پیش‌بینی بار کمانش پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک پرداختند و با اعمال بار بیش از ۹۰٪ بار کمانش تجربی، برای روش تجربی و عددی به ترتیب تنها ۳ و ۵٪ خطا نسبت به بار کمانش تجربی سازه مشاهده نمودند که نشان از کارایی روش همبستگی ارتعاشی در هر دو حالت تجربی و عددی برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته استوانه کامپوزیتی تقویت‌شده بود.

هدف این پژوهش محاسبه بار کمانش ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک لوزی به کمک روش همبستگی ارتعاشی و بر پایه داده‌های تجربی است. برای ساخت نمونه‌ها از روش رشته پیچی به کمک قالب سیلیکونی و لایه‌چینی دستی استفاده شده است. ابتدا بار کمانش خطی سازه با کمک نرم‌افزار آباکوس به دست می‌آید. سپس با کمک آنالیز مودال، تغییرات فرکانس سازه با تغییرات بار محوری اعمالی به سازه محاسبه می‌شود. در ادامه با کمک روش همبستگی ارتعاشی تجربی مقدار بار کمانش سازه محاسبه می‌شود. برای محاسبه میزان دقت و کارایی این روش، با انجام آزمون فشار محوری روی چهار نمونه، بار کمانش تجربی با بار پیش‌بینی شده با کمک روش همبستگی ارتعاشی مقایسه می‌شود. در پایان تاثیر بازه بار بر دقت روش همبستگی ارتعاشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

ساخت هندسه و مواد مصرفی

سازه مورد مطالعه در این پژوهش یک ورق کامپوزیتی ساندویچی است. نحوه قرارگیری دو ورق و هسته نسبت به هم و شکل کلی نمونه نهایی ورق ساندویچی در شکل ۱ قابل مشاهده است. هسته از نوع مشبک لوزی و از جنس کامپوزیت است. ابعاد ورق‌ها ۳۰۰×۲۴۰ میلی‌متر، ضخامت ورق داخلی ۱/۳ میلی‌متر، ضخامت ورق بیرونی ۱/۴ میلی‌متر و سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها ۵×۵ میلی‌متر است. زاویه تقویت‌کننده‌ها نسبت به سطح افقی نیز $17^{\circ} \pm$ است. در ورق‌ها از پارچه ۹۰ و شیشه با چگالی سطحی 2.0 gr/m^2 و در تقویت‌کننده‌ها از الیاف شیشه تک جهت با چگالی طولی ۲/۴ گرم به‌عنوان الیاف استفاده می‌شود. همچنین برای ماده زمینه از رزین اپوکسی ML506 در ساخت تمامی اجزا استفاده شده است.

ساخت ورق تقویت‌شده

در این پژوهش برای ساخت ورق‌ها از روش لایه چینی دستی استفاده شده است. سخت‌ترین و حساس‌ترین قسمت در ساخت نمونه‌های مشبک ساندویچی ساخت هسته است. روش‌های مختلفی همانند شکل‌دهی آزاد و رشته پیچی با استفاده از قالب‌های متفاوتی از جمله تفلونی، سیلیکونی، فومی و گچی را می‌توان برای ساخت شبکه تقویت‌کننده استفاده کرد که هر کدام دارای مزایا و

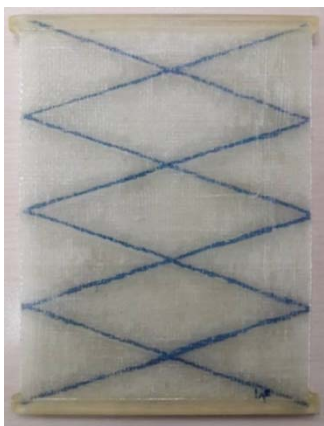
مشاهده کارایی روش همبستگی ارتعاشی برای تیرها، موجب استفاده از این روش برای پیش‌بینی بار کمانش سایر سازه‌ها از جمله ورق‌ها و پوسته‌ها شد. *لوری* [13] با تعمیم روش همبستگی ارتعاشی برای ورق ساده، مشاهده نمود که ورق‌های دارای نقص هندسی بزرگ، انحراف بالایی را برای ارتباط خطی بین فرکانس و بار دارند. *سوکاجیت و سینگاتاناجیت* [14, 15] با محاسبه بار کمانش و تحلیل فرکانسی بر روی ورق ساده مستطیلی و با کمک ارتباط خطی بین بار کمانش و مربع فرکانس، به پیش‌بینی بار کمانش ورق پرداختند. *آبراموویچ و همکاران* [16] به پیش‌بینی بار کمانش سه پل و یک پوسته استوانه پرداختند، آنها برای پیش‌بینی بار کمانش از روش ارایه شده توسط *سوز* [17, 18] استفاده کردند. در این پژوهش مشخص شد که به دلیل رفتار پایدار پل‌ها در پس‌کمانش، می‌توان با اعمال بازه بار تا بار کمانش سازه و ثبت تغییرات فرکانس نتایج دقیق‌تری را برای محاسبه بار کمانش به دست آورد. *جانسون و همکاران* [19] با در نظر گرفتن نقایص هندسی و اثرات غیرخطی وضعیت استاتیکی به بررسی بار کمانش پوسته‌ها پرداختند. *چاوز و رگاز و همکاران* [20] به بررسی تجربی و عددی ارتباط بار کمانش و مربع فرکانس ورق دارای تقویت‌کننده پرداختند. با توجه به شباهت چهار مود اول و مود دهم فرکانسی و ارتعاشی سازه، بار کمانش سازه در همه پنج حالت محاسبه شد.

برای بهبود روش همبستگی ارتعاشی، یک روش جدید برای پیش‌بینی بار کمانش ارایه شد. در این روش همانند روش *سوز* [18] از رابطه بین فرکانس و فشار محوری سازه، پارامتر ناک دان ξ^2 (Knock down factor)، به دست می‌آید و به کمک آن، بار کمانش سازه محاسبه می‌شود. *آریلو و همکاران* [21, 22] با استفاده از روش نوین همبستگی ارتعاشی به تخمین تجربی و عددی بار کمانش سه پوسته استوانه‌ای پرداختند و دقت و برتری روش همبستگی ارتعاشی نوین نسبت به روش *سوز* را نشان دادند. آنها همچنین با تخمین شرایط مرزی واقعی ورق ساده به کمک روش همبستگی ارتعاشی، بار کمانش را با دقت بیشتری محاسبه نمودند. *کالننيس و همکاران* [23] میزان بازه‌های نیروی اعمالی برای استفاده از روش همبستگی ارتعاشی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها دقت بسیار خوبی برای اعمال بار بیشتر از ۸۰٪ بار کمانش را نشان می‌داد. *اسکوکیس و همکاران* [24] دوپوسته استوانه کامپوزیتی از جنس کربن-اپوکسی را به‌عنوان نمونه بررسی کردند. آنها با انجام آزمایش آنالیز تجربی اثر بازه بار اعمالی بر پیش‌بینی بار کمانش را مورد بررسی قرار دادند و برای بازه بین صفر تا ۶۵٪ هم‌خوانی مناسبی بین بار کمانش تقریب زده‌شده و بار کمانش تجربی بحرانی وجود خواهد داشت.

شاهقلیان و همکاران [25, 26] به پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های کامپوزیتی به روش نوین پرداختند، آنها ابتدا بار کمانش را به روش تحلیلی محاسبه نمودند سپس با کمک تحلیل عددی، تغییرات فرکانس سازه را محاسبه نمودند. اختلاف نتیجه روش همبستگی ارتعاشی نوین با میانگین نتایج آزمون فشار محوری تنها ۳٪ خطا



شکل ۳) ورق تقویت شده



شکل ۴) ورق کامپوزیتی ساندویچی نهایی ساخته شده

رهیافت همبستگی ارتعاشی

روش همبستگی ارتعاشی بر پایه نتایج تجربی شامل سه بخش اصلی محاسبه بار کمانش خطی، محاسبه تغییرات فرکانس سازه با تغییر بار اعمالی و پیش‌بینی بار کمانش است که در ادامه توضیحات هر بخش ارائه می‌شود.

محاسبه بار کمانش خطی عددی

اولین قدم در استفاده از روش همبستگی ارتعاشی محاسبه بار کمانش خطی است. بار کمانش خطی را می‌توان از دو روش تحلیلی یا عددی محاسبه نمود. در این پژوهش از نرم‌افزار المان محدود آباکوس (Abaqus) برای محاسبه بار کمانش استفاده شده است. مدل‌سازی با توجه به ابعاد نمونه‌های ساخته شده انجام شده است. اجزای نمونه با کمک رزین با مدول الاستیسیته بالا به هم متصل شده و هیچ‌گونه حرکت نسبی بین اجزا وجود ندارد. بنابراین از قید تای (Tie) برای مقید کردن ورق‌ها و شبکه تقویت‌کننده نسبت به هم استفاده شده است.

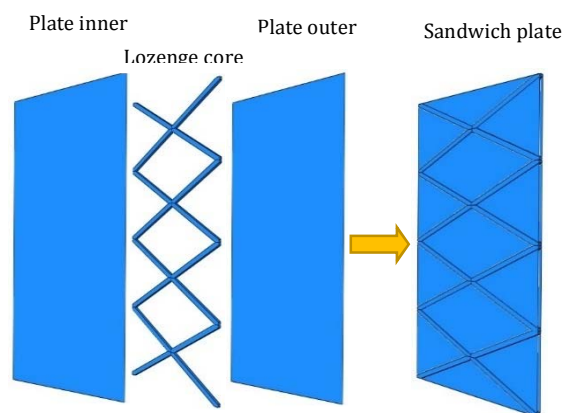
برای محاسبه E_1 و G_{12} در ورق به ترتیب برطبق استاندارد ASTM D3039 و ASTM D3518، برای هر خاصیت چهار نمونه ساخته شد. برای محاسبه خواص از دستگاه کشش INSTRON 5500R با Frame-6027 استفاده شد. نمونه‌ها با سرعت 2mm/min

معایبی هستند. با توجه به دقت و قیمت مناسب، در این پژوهش از روش رشته پیچی دستی با کمک قالب سیلیکونی برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. قالب سیلیکونی ساخته شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

عملیات پیچش الیاف و اضافه کردن رزین تا پر شدن کامل شیارهای قالب سیلیکونی ادامه می‌یابد. در ادامه بلافاصله شش لایه الیاف بر روی شبکه قرار داده می‌شود و هر لایه پس از قرار گرفتن بر روی شبکه به‌طور کامل به رزین آغشته می‌شود. در ادامه و برای خروج حباب و رزین اضافی نمونه‌ها، بر روی آنها وزنه قرار داده می‌شود و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها خشک شده و پس از جدا کردن از قالب سیلیکونی، قسمت‌های اضافی آنها برش داده می‌شوند. در شکل ۳ نمونه ورق کامپوزیتی تقویت‌شده مشاهده می‌شود.

ساخت ورق ساندویچی

به‌طور جداگانه یک ورق شش لایه با کمک لایه چینی دستی ساخته می‌شود و با رزین به ورق تقویت‌شده متصل می‌شود. برای تعادل و اعمال نیروی یکسان به نمونه‌ها حین انجام آزمایش و نیز ایجاد یک سطح مقطع پهن‌تر برای ایجاد شرایط مرزی گیردار، با کمک قالب تفلونی دو تب به طول ۲۶۰ میلی‌متر و عرض ۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱ میلی‌متر در دو طرف نمونه‌ها ایجاد می‌کنیم. شکل ۴ یکی از چهار ورق کامپوزیتی ساندویچی نهایی ساخته شده را نشان می‌دهد.

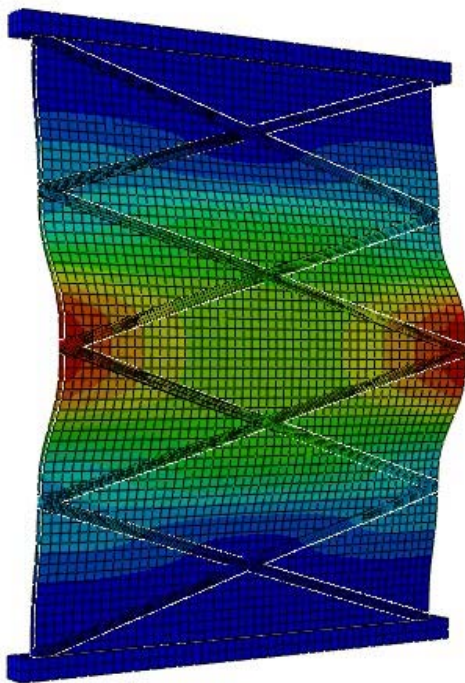


شکل ۱) ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک لوزی



شکل ۲) قالب سیلیکونی

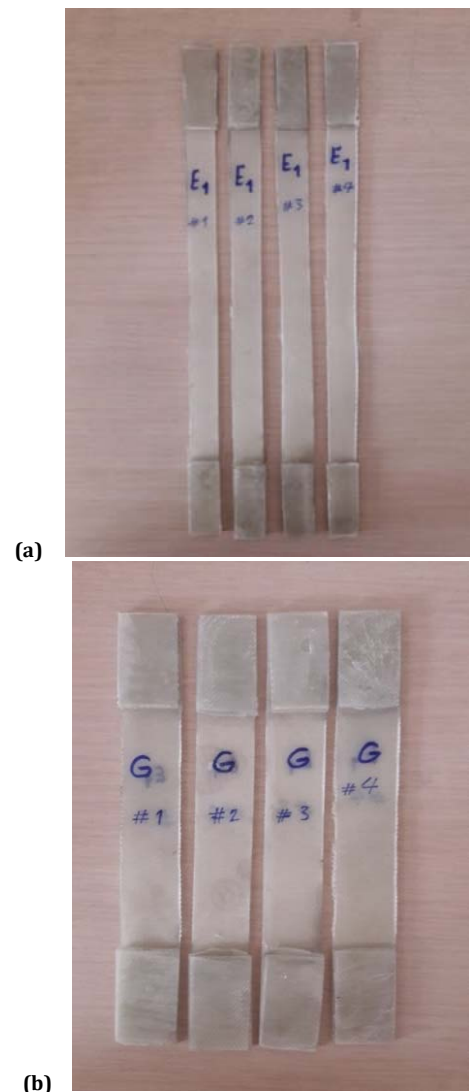
برای المان‌بندی چندلایه کامپوزیتی از المان پوسته مرسوم استفاده شده است. به‌طور کلی برای اجزایی از سازه که بعد ضخامت از دو بعد دیگر به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر است، می‌توان از المان پوسته با مرتبه خطی S8R استفاده کرد. همچنین برای المان بندی تقویت‌کننده‌ها و تب‌های انتهایی نمونه از المان‌های مکعبی سه‌بعدی C3D20 استفاده شده است. مطالعه همگرایی مش با در نظر گرفتن ۶ حالت مختلف برای ابعاد و تعداد المان‌ها انجام شد و تعداد 35940 المان، به‌عنوان تعداد المان بهینه به دست آمد. در پایان با توجه به شرایط سازه در حین انجام آزمون، شرایط مرزی گیردار-گیردار به لبه بالایی و پایینی سازه اعمال می‌شود و تنها به دلیل حرکت فک دستگاه یونیورسال حرکت انتقالی در راستای محوری برای لبه بالایی مقید نمی‌شود. با انجام تحلیل خطی بار کمانش عددی مود اول ورق کامپوزیتی ساندویچی ۱۱/۶kN به دست می‌آید. شکل ۶ شکل مود اول کمانشی سازه را نشان می‌دهد.



شکل ۶) مود اول کمانش ورق کامپوزیتی ساندویچی

محاسبه تغییرات فرکانس تجربی نمونه با تغییر بار اعمالی در روش همبستگی ارتعاشی نیاز به تغییر بار اعمالی بر سازه و محاسبه فرکانس است. برای اعمال بار از دستگاه یونیورسال Shijin wdw.300e استفاده شده است (شکل ۷). همچنین برای محاسبه فرکانس تجربی سازه، آنالیز مودال (Modal Analysis) تجربی به‌کار گرفته شده است. برای انجام آنالیز مودال از چکش برای تحریک سازه، از شتاب‌سنج PCB برای خواندن واکنش سازه به تحریک و از دستگاه آنالیزر برای ثبت و پردازش اطلاعاتی استفاده می‌شود. شکل ۸ کلیه تجهیزات مورد استفاده برای انجام آنالیز مودال را نشان می‌دهد.

تحت کشش قرار گرفتند. نمونه‌ها و نتایج حاصل در شکل ۵ و نمودار ۱ ارایه شده‌اند. خواص مورد نیاز برای تقویت‌کننده‌ها نیز با محاسبه خواص الیاف و رزین و محاسبه درصد حجمی هر جز در تقویت‌کننده با سوزاندن بخشی از نمونه در کوره، به کمک روابط میکرومکانیک [28] محاسبه شده است. در جدول ۱ خواص مکانیکی ورق و تقویت‌کننده ارایه شده است.



شکل ۵) نمونه‌های تست خواص (a) E1 و (b) G12

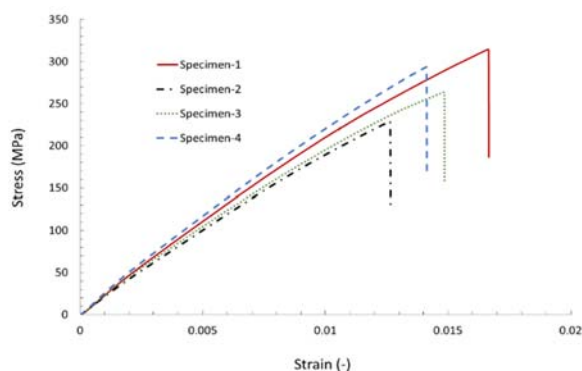
جدول ۱) خواص مکانیکی ورق و تقویت‌کننده

تقویت‌کننده	ورق	مشخصه	چگالی (kg/m ³)
۱۲۸۶	۱۵۹۵	ρ	
۲۱/۱۴	۲۰/۰۳	E ₁	مدول الاستیسیته (GPa)
۵/۵	۲۰/۰۳	E ₂	
۵/۵	۶	E ₃	
۱/۹	۱/۷۷	G ₁₂ =G ₁₃	مدول برشی (GPa)
۲/۵	۱/۸۶	G ₂₃	
۰/۲۷۵	۰/۳	$\nu_{12}=\nu_{13}$	ضریب پواسون
۰/۰۷۹۸	۰/۲۱	ν_{23}	

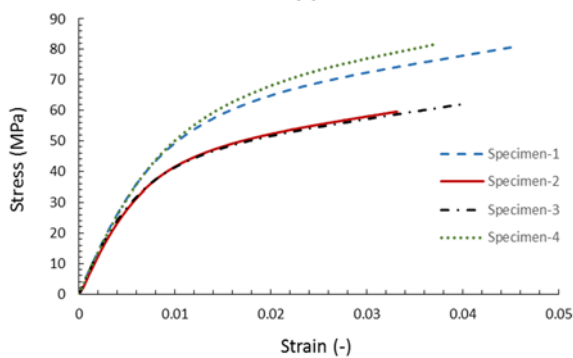


شکل ۹) شبکه‌بندی نمونه برای انجام آنالیز مودال

برای انجام آزمون مودال نمونه تحت بار، مطابق شکل ۹ یکی از چهار نمونه ساخته شده با چهار نقطه در جهت عرض و پنج نقطه در جهت ارتفاع با فاصله 5×5 سانتی‌متر شبکه‌بندی می‌شود. بار اعمالی به سازه نیز از صفر تا ۸ بار فشاری محوری با گام ۱ بار فشاری محوری به سازه اعمال می‌شود و به ازای هر بار اعمالی، سازه در نقاط شبکه‌بندی به کمک چکش تحریک می‌شود. نمودار ۲ یکی از نمودارهای نیرو-زمان است که از حس‌گر درون چکش به دست می‌آید. نمودار ۳ نیز به‌عنوان مثالی از نمودار شتاب-زمان ارائه شده است که توسط شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. نمودارهای ۲ و ۳ از تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال در دستگاه آنالایزر به دست آمده‌اند. با تبدیل فوریه سریع (Fast Fourier Transform) روی داده‌های به دست آمده به کمک نرم‌افزار اورجین پرو (Origin pro)، نمودار تابع پاسخ فرکانسی نمودار ۴ به دست می‌آید.

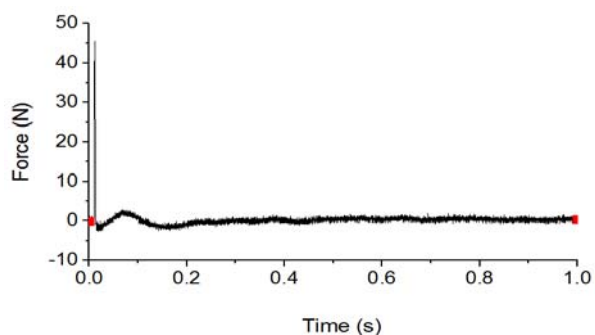


(a)



(b)

نمودار ۱) منحنی تنش-کرنش تست خواص: E_1 : a و G_{12} : b



نمودار ۲) منحنی نیرو- زمان



شکل ۷) شماتیکی از دستگاه یونیورسال



شکل ۸) نمونه‌ای از تجهیزات آنالیز مودال

پیش‌بینی بار کمانش

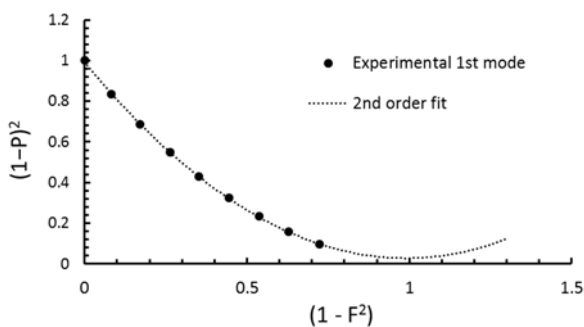
برای پیش‌بینی بار کمانش به روش همبستگی ارتعاشی سه روش اولیه [16, 20]، سوزا [18] و نوین [22, 27] وجود دارد. با توجه به اثبات دقت بیشتر روش همبستگی ارتعاشی نوین نسبت به دو روش دیگر [21]، در این پژوهش از روش نوین برای پیش‌بینی بار استفاده شده است.

در روش همبستگی ارتعاشی نوین ابتدا نیاز به ترسیم نمودار $(1-F^2)$ بر حسب P با توجه به داده‌های دو بخش قبل است، که در آن $P = \frac{p}{p_{cr}}$ و $F = \frac{f_m}{f_0}$ است. در این بخش p بار فشاری محوری، p_{cr} بار کمانش خطی، f_m فرکانس ارتعاشی تجربی مود اول نمونه در بار p و f_0 فرکانس طبیعی تجربی مود اول نمونه بدون بار است. در ادامه یک منحنی درجه دو به نقاط رسم شده برازش می‌شود. مقدار حداقل محور عمودی منحنی درجه دو اندازه ξ^2 را نشان می‌دهد که یک پارامتر تجربی ظرفیت افت بار است. نمودار ۶ نحوه رسم منحنی درجه دو و محاسبه پارامتر ξ^2 را برای نمونه با اعمال بار به سازه تا ۶۳٪ بار خطی عددی نشان می‌دهد.

پس از محاسبه پارامتر ظرفیت افت بار، با کمک رابطه ۱ [22]، مقدار بار کمانش سازه به روش همبستگی ارتعاشی به دست می‌آید. در این رابطه مقدار p_{cr} برابر با بار کمانش خطی به دست آمده از تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس است.

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

در جدول ۳ معادله منحنی درجه دو برازش شده، مقدار پارامتر افت بار، و بار کمانش پیش‌بینی شده به کمک رابطه ۱ مشاهده می‌شود.



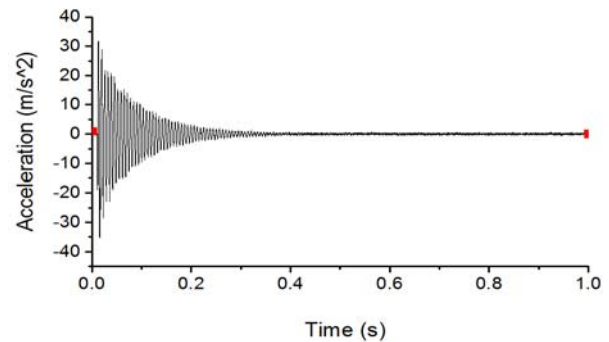
نمودار ۶) منحنی رهیافت همبستگی ارتعاشی

جدول ۳) پیش‌بینی بار کمانش با روش همبستگی ارتعاشی

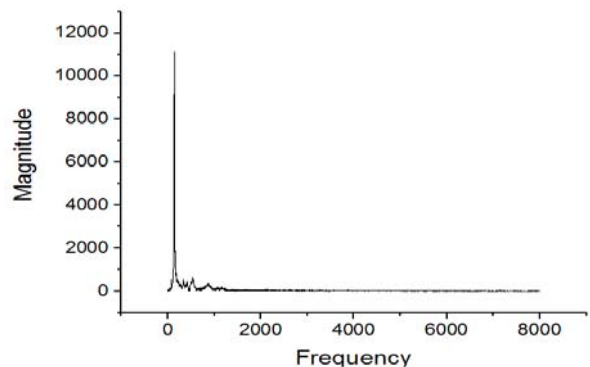
پارامتر	مقدار
درصد بار اعمالی	۶۳
معادله منحنی برازش شده	$y = 1/0.595x^2 - 1/9.844x + 0.9951$
مقدار ξ^2	۰/۰۶۵۹۳
بار کمانش (kN)	۸/۶۵

آزمون فشار محوری

برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده و تعیین میزان دقت و اعتبار روش همبستگی ارتعاشی، هر چهار نمونه به کمک دستگاه یونیورسال Shijin wdw.300e تحت آزمون فشار محوری قرار



نمودار ۳) منحنی شتاب- زمان

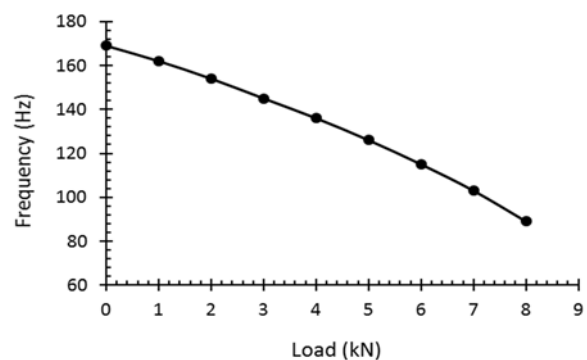


نمودار ۴) تابع پاسخ فرکانسی

نتایج آزمون مودال نمونه سازه تحت بار در جدول ۲ ارائه شده است. برای درک بهتر نحوه تغییرات فرکانس، این نتایج در نمودار نیرو-فرکانس نمودار ۵ نیز ارائه شده است. این نمودار تغییرات کاهشی فرکانس مود اول نمونه را به ازای افزایش بار نشان می‌دهد که کاملاً منطبق بر تئوری مسئله است.

جدول ۲) تغییرات فرکانس تجربی مود اول نمونه به بار

بار اعمالی (kN)	فرکانس تجربی مود اول (Hz)
۰	۱۶۹
۱	۱۶۲
۲	۱۵۴
۳	۱۴۵
۴	۱۳۶
۵	۱۲۶
۶	۱۱۵
۷	۱۰۳
۸	۸۹



نمودار ۵) منحنی فرکانس اول تجربی به بار

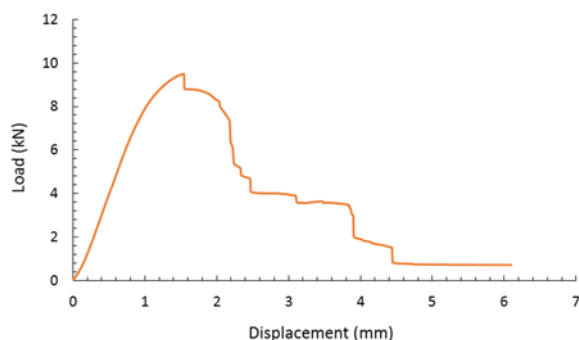


شکل ۱۰ نمونه پس از کمانش

گرفتند تا بار بحرانی سازه مشخص شود. دستگاه در حالت کنترل جابه‌جایی با سرعت ۲ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد و بارگذاری تا یافتن بار کمانش سازه ادامه یافت. شکل ۱۰ یک نمونه را پس از کمانش زیر فک دستگاه نشان می‌دهد. نمودار نیرو- جابه‌جایی برای این نمونه در نمودار ۷ قابل مشاهده است. علاوه بر شکل مود کمانش تجربی که در شکل ۱۰ نشان دهنده کمانش کلی است، تغییرات نمودار نیرو-جابه‌جایی نیز هیچ افت بار موضعی را نشان نمی‌دهد بنابراین کمانش سازه کلی است نه محلی. بار کمانش هر کدام از نمونه‌ها و مقدار میانگین داده‌ها در جدول ۴ ارایه شده است.

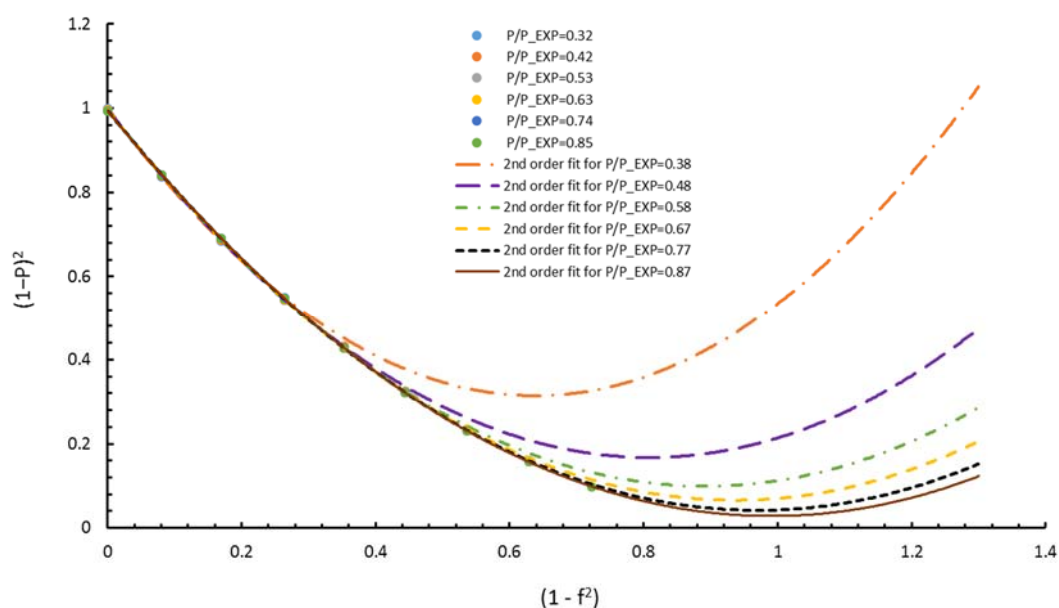
بررسی اثر بازه بار اعمالی بر دقت روش همبستگی ارتعاشی

با افزایش درصد بار اعمالی به سازه برای محاسبه تغییرات فرکانس، به طور کلی دقت پیش‌بینی بار کمانش افزایش می‌یابد اما امکان آسیب به سازه نیز افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش محاسبه درصد بار اعمالی بهینه بر نمونه‌های پژوهش برای رسیدن به جواب قابل قبول است. با استفاده از فرکانس‌های به دست آمده از جدول ۲، نمودار ۸ برای ۶ بازه بار با حداقل بار صفر و حداکثر بار اعمالی متفاوت ترسیم می‌شود. جزئیات این نمودار و بار پیش‌بینی شده در نمودار ۸ و جدول ۵ ارایه شده است.



نمودار ۷) منحنی نیرو- جابه‌جایی

جدول ۴) بار کمانش تجربی	
شماره نمونه	بار کمانش تجربی (kN)
اول	۹/۶
دوم	۹/۵
سوم	۹/۵
چهارم	۹/۲
میانگین	۹/۴۵



نمودار ۸) بررسی تأثیر حداکثر بار اعمالی بر دقت روش همبستگی ارتعاشی

حداکثر بار اعمالی (kN)	درصد بار اعمالی به بار کمانش تجربی	معادله منحنی برازش شده	پارامتر افت بار ξ^2	$P_{VCT-EXP}$ (kN)	درصد خطا به بار کمانش تجربی
۳	۳۲	$y = 1/16826x^2 - 2/1470x + 0/9990$	۰/۳۱۴۳	۵/۱	۴۶
۴	۴۲	$y = 1/269x^2 - 2/0520x + 0/9970$	۰/۱۶۷۶	۶/۸۵	۲۷/۵
۵	۵۳	$y = 1/1206x^2 - 2/0092x + 0/9961$	۰/۰۹۹۴۹	۷/۹۴	۱۶
۶	۶۳	$y = 1/0505x^2 - 1/9844x + 0/9901$	۰/۰۶۵۹۳	۸/۶۲	۸/۸
۷	۷۴	$y = 1/0121x^2 - 1/9632x + 0/994$	۰/۰۴۱۹۸	۹/۲۲	۲/۴
۸	۸۵	$y = 0/9841x^2 - 1/9486x + 0/993$	۰/۰۲۸۴	۹/۶۵	۲/۱

نتیجه گیری

در این پژوهش بار بحرانی کمانش ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک لوزی شکل با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی تجربی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا درباره نحوه ساخت چهار نمونه مورد نیاز به کمک روش رشته پیچی و لایه چینی دستی و با کمک قالب سیلیکونی توضیحاتی ارائه شد. سپس برای محاسبه بار کمانش به کمک روش همبستگی ارتعاشی نوین، درباره سه مرحله اصلی محاسبه بار کمانش خطی به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس، محاسبه تغییرات فرکانس با تغییر بار با استفاده از آنالیز مودال و محاسبه بار با استفاده از محاسبه ضریب ناک دان، توضیحاتی ارائه و نتایج آنها بیان شد. و در پایان برای صحت سنجی نتایج به دست آمده از روش همبستگی ارتعاشی هر چهار نمونه تحت آزمون فشار محوری قرار گرفتند تا بار کمانش تجربی به دست آید. نتایج کلی این پژوهش عبارتند از:

بار کمانش پیش بینی شده به کمک روش همبستگی ارتعاشی ۹/۶۵kN به دست آمد و اختلاف آن با بار کمانش تجربی که مقدار آن ۹/۴۵kN بود تنها ۲/۱٪ است. این نتایج نشان دهنده کارایی روش غیر مخرب همبستگی ارتعاشی برای پیش بینی بار کمانش ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک است.

با بررسی شش بازه بار اعمالی متفاوت مشخص شد که با افزایش درصد بار اعمالی و تعداد دفعات اندازه گیری فرکانس، دقت پیش بینی بار کمانش افزایش می یابد، به طوری که با اعمال بار بیش از ۶۳٪ بار کمانش تجربی امکان پیش بینی بار بحرانی با خطای کمتر از ۹٪ وجود دارد.

فهرست علائم و نشانه ها

علائم انگلیسی

E	مدول الاستیسیته (GPa)
F	نسبت فرکانس به فرکانس آزاد
f	فرکانس (Hz)
G	مدول برشی (GPa)
P	نسبت بار فشاری به بار کمانش
p	بار فشاری محوری (kN)

علائم یونانی

ξ^2	پارامتر تجربی ناک دان
ρ	چگالی (kg/m^3)
u	ضریب پواسون

زیرنویس

0	بدون نیروی محوری
cr	بحرانی
m	با نیروی محوری

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- 1- Ambur DR, Rehfield LW. Effect of stiffness characteristics on the response of composite grid-stiffened structures. Journal of Aircraft. 1993;30(4):541-546.
- 2- Laura PAA, Gutierrez RH, Sanzi HC, Elvira G. Buckling of circular, solid and annular plates with an intermediate circular support. Ocean Engineering. 2000;27(7):749-755.
- 3- Kim TD. Fabrication and testing of composite isogrid stiffened cylinder. Composite Structures. 1999;45(1):1-6.
- 4- Shahgholian-Ghahfarokhi D, Tahani V, Rahimi GH. Experimental and numerical investigation of the effect of longitudinal and horizontal ribs on flexural behavior of grid stiffened composite plates. Journal of Science and Technology of Composites. 2017;3(4):333-342.
- 5- Tahani V, Shahgholian D, Rahimi GH. Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of grid composite plates. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(6):303-311. [Persian]
- 6- Yazdani M, Hossein R, Afaghi Khatibi A. An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading. Scientific Research and Essay. 2009;4(9):914-920.
- 7- Shojaee T, Mohammadi B, Madoliat R. Experimental and numerical investigation of stiffener effects on buckling strength of composite laminates with circular cutout. Journal of Composite Materials. 2020;54(9):1141-1160.
- 8- Chen L, Fan H, Sun F, Zhao L, Fang D. Improved manufacturing method and mechanical performances of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder. Thin-Walled Structures. 2013;68:75-84.
- 9- Zhang H, Sun F, Fan H, Chen H, Chen L, Fang D. Free vibration behaviors of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder. Composite Science and Technology. 2014;100:26-33.

- Council of the Aeronautical Sciences, 2014, September, 7-12, ST. Petersburg, Russia. Ontario: ICAS; 2014.
- 20- Chaves-Vargas M, Dafnis A, Reimerdes HG, Schröder KU. Modal parameter identification of a compression-loaded CFRP stiffened plate and correlation with its buckling behaviour. *Progress in Aerospace Science*. 2015;78:39-49.
- 21- Arbelo MA, Kalnins K, Ozolins O, Skukis E, Castro SG, Degenhardt R. Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using a vibration correlation technique. *Thin-Walled Structures*. 2015;94:273-9.
- 22- Arbelo MA, Almeida S, Donadon MV, Rett SR, Degenhardt R, Castro SGP, et al. Vibration correlation technique for the estimation of real boundary conditions and buckling load of unstiffened plates and cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*. 2014;79:119-128.
- 23- Kalnins K, Arbelo MA, Ozolins O, Skukis E, Castro SGP, Degenhardt R. Experimental nondestructive test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using vibration correlation technique. *Shock and Vibration*. 2015;2015:729684.
- 24- Skukis E, Ozolins O, Kalnins K, Arbelo MA. Experimental test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells by vibration correlation technique. *Procedia Engineering*. 2017;172:1023-30.
- 25- Shahgholian Ghahfarokhi D, Raafat MR, Rahimi GH. Prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using vibration correlation technique. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;5(3):359-368.
- 26- Shahgholian Ghahfarokhi D, Rahimi GH. Prediction of the critical buckling load of stiffened composite cylindrical shells with lozenge grid based on the nonlinear vibration analysis. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(4):135-143. [Persian]
- 27- Shahgholian-Ghahfarokhi D, Rahimi G. Buckling load prediction of grid-stiffened composite cylindrical shells using the vibration correlation technique. *Composites Science and Technology*. 2018;167:470-481.
- 28- Gibson RF. *Principles of composite material mechanics*. Florida: CRC Press; 2011.
- 10- Zarei M, Rahimi GH. Free vibration analysis of grid stiffened composite conical shells. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2017;4(1):1-8.
- 11- Shahgholian-Ghahfarokhi D, Ghanadi A, Rahimi H. Experimental and numerical investigation of the free vibration of composite sandwich plates with lattice cores. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(10):1-8. [Persian]
- 12- Sommerfeld A. A simple device to illustrate the buckling process. Unknown City: *Zeitschrift des Verein Deutscher Ingenieure (ZVDI)*; 1905.pp. 1320-1323. [German]
- 13- Lurie H. *Lateral vibrations as related to structural stability [Dissertation]*. Pasadena: California Institute of Technology; 1950.
- 14- Sukajit P, Singhatanadgid P. Identification of buckling load of thin plate using the vibration correlation technique. 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 2007, 17-19 October 2007, Chonburi Province, Thailand. Unknown City: TSME: 2007.
- 15- Singhatanadgid P, Sukajit P. Determination of buckling load of rectangular plates using measured vibration data. *Proceeding of the International Conference on Experimental Mechanics and Seventh Asian Conference on Experimental Mechanics*, 2008, November, 8-11, Nanjing, China. Bellingham, Washington: SPIE; 2009.
- 16- Abramovich H, Govich D, Grunwald A. Buckling prediction of panels using the vibration correlation technique. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015;78:62-73.
- 17- Souza MA, Fok WC, Walker AC. Review of experimental techniques for thin-walled structures liable to buckling: Neutral and unstable buckling. *Experimental Techniques*. 1983;7(9):21-25.
- 18- Souza MA, Assaid LMB. A new technique for the prediction of buckling loads from nondestructive vibration tests. *Experimental Mechanics*. 1991;31:93-97.
- 19- Jansen EL, Abramovich H, Rolfes R. The direct prediction of buckling loads of shells under axial compression using VCT—towards an upgraded approach. *Proceedings of the 27th Congress of the International*