

پیش‌بینی بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی

داود شاهقلیان قهفرخی، میلاد آقایی روزبهانی، غلامحسین رحیمی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۱۴
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

کلمات کلیدی:

ورق کامپوزیتی تقویت‌شده،
روش همبستگی ارتعاشی،
کمانش،
ساخت،
تحلیل عددی

خلاصه: سازه‌های کامپوزیتی مشبک به دلیل خواص منحصر بفردشان، یکی از سازه‌های پر کاربرد در صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی می‌باشند. در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش سازه‌های کامپوزیتی، بدون خرابی یا شکست انجام شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های غیرمخرب، روش همبستگی ارتعاشی می‌باشد. هدف تحقیق حاضر پیش‌بینی بار بحرانی کمانش ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی می‌باشد. برای این منظور در ابتدا تحلیل ارتعاشات غیرخطی ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و در بارهای فشاری مختلف انجام شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از نتایج عددی و روش همبستگی ارتعاشی، بار بحرانی کمانش سازه مذکور پیش‌بینی گردید. در ادامه و برای صحت سنجی نتایج روش همبستگی ارتعاشی، سه ورق تقویت شده کامپوزیتی مشابه و با شرایط یکسان و با استفاده از روش با روش رشته‌پیچی و لایه چینی دستی 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 پیش‌بینی شده به روش همبستگی ارتعاشی با بار بحرانی کمانش به دست آمده از آزمایش تجربی کمتر از ۵ درصد می‌باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش همبستگی ارتعاشی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش با دقت بسیار بالا برای ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده می‌باشد.

۱- مقدمه

روش با توجه به تشابه شکل مودهای ارتعاشی و کمانشی و بر مبنای محاسبه‌ی فرکانس طبیعی سازه‌ی بارگذاری شده، می‌باشد. در روش همبستگی ارتعاشی با افزایش بار وارده و ثبت تغییرات فرکانس طبیعی، بار بحرانی کمانش سازه پیش‌بینی می‌شود.

یکی از اولین مطالعات انجام گرفته بر روی رفتار ورق‌های تقویت شده کامپوزیتی، بررسی اثر سطح مقطع تقویت کننده‌ها بر مقاومت کمانشی ورق‌های تحت بار فشاری محوری توسط آمبور و رفیلد [۱] می‌باشد. هیوز و همکاران [۲] به بررسی کمانش محلی و کلی ورق تقویت شده با تقویت کننده‌های T شکل که تحت فشار تک محوری بودند، پرداختند. لارا و همکاران [۳] با استفاده از روش ریلی-ریتز، حل کمانش ورق‌های کامپوزیتی با ضخامت متغیر ارائه نمودند. جینکسان و همکاران [۴] به پیش‌بینی آنالیز شکست سازه‌های مشبک کامپوزیتی با آزمون فشار محوری پرداختند و نتایج به دست آمده را با نتایج عددی مورد بررسی قرار دادند. چن و گیسیون [۵] با استفاده از روش اجزای محدود به آنالیز مودال پنل‌های کامپوزیتی

با پیشرفت صنعت و تکنولوژی نیاز به سازه‌هایی با استحکام و سفتی بالا و در عین حال دارای وزن کم، باعث افزایش استفاده از سازه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک در صنایع مختلف نظیر هوافضا، دفاعی، دریایی و اتومبیل شده است. تحلیل‌های مختلفی نظیر 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 کمانش یکی از مهم‌ترین تحلیل‌های خرابی این نوع سازه‌ها می‌باشد.

روش‌های متعددی برای محاسبه‌ی بار کمانش سازه‌های مختلف وجود دارد. یکی از مهم‌ترین روش‌های غیرمخرب برای محاسبه‌ی بار کمانش، روش همبستگی ارتعاشی^۱ می‌باشد که در واقع پل ارتباطی بین کمانش و ارتعاشات است. در این روش بدون شکست، خرابی و رسیدن به ناپایداری، می‌توان بار کمانش سازه را پیش‌بینی نمود. این

1 Vibration Correlation Technique (VCT)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rahimi_gh@modares.ac.ir



مشبک پرداختند و نشان دادند شکل مد ارتعاشی پنل کامپوزیتی مشبک با پنل همسانگرد یکسان می‌باشد. رحیمی و همت‌نژاد [۶] به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای مشبک تقویت‌شده پرداختند. با استفاده از روش معادل‌سازی حل تحلیلی برای استوانه‌های مذکور ارائه نمودند. شاهقلیان و همکاران [۷] به بررسی تجربی و عددی ارتعاش آزاد ورق کامپوزیتی ساندویچی با هسته‌ی مشبک پرداختند و کارایی سازه ساندویچی نسبت به ورق ساده برای افزایش فرکانس طبیعی را بررسی نمودند. همچنین با استفاده از روش تاگوچی و مطالعه عددی نشان دادند که پارامتر ضخامت پوسته بیشترین اثر را بر روی افزایش فرکانس دارد.

تجربه‌ی موفقیت آمیز استفاده از روش همبستگی ارتعاشی برای تیرها و ستون‌ها، زمینه‌ساز استفاده از آن برای محاسبه‌ی بارکمانش سازه‌های دیگری نظیر ورق‌ها و پوسته‌های جدارنازک گردید. از دیگر مزایای روش همبستگی ارتعاشی علاوه بر پیش‌بینی بارکمانش سازه‌های جدار نازک، تعیین شرایط مرزی حقیقی سیستم می‌باشد. لوری [۸] مفهوم روش همبستگی ارتعاشی را برای ورق‌های ساده تمهیم داد و یک حل دقیق برای ورق ساده با ضخامت ثابت و تکیه‌گاه ساده به دست آورد. ایشان همچنین با بررسی تجربی ورق‌های دارای نقص هندسی بزرگ، انحراف قابل توجهی در رابطه‌ی خطی بین مربع فرکانس و بارکمانش مشاهده نمود. چالکس و همکاران [۹] با انجام آزمایش‌های تجربی نتایج لوری مبنی بر قابل اعتماد بودن نتایج روش همبستگی ارتعاشی تنها برای نمونه‌های دارای نقص هندسی کوچک را تایید کرد. آبراموویچ و همکاران [۱۰] فرمولاسیون مناسبی میان بار کمانش و حداقل فرکانس در یک ورق دایره‌ای تحت بار شعاعی ارائه نمودند و بر اساس نتایج به دست آمده، بارکمانش تجربی را ۱۵ درصد کمتر از بارکمانش تئوری محاسبه نمود. در سال ۲۰۰۲ یک جمع‌بندی مختصر از فرضیات، کاربردها، ابزار آزمایشات و نتایج روش همبستگی ارتعاشی توسط سینگر و همکاران [۱۱] ارائه شد. در همین سال هون و همکاران [۱۲] نشان دادند که شرایط مرزی اثر قابل ملاحظه‌ای بر بار کمانش پوسته‌های کامپوزیتی می‌گذارد. بنابراین با تعیین شرایط مرزی حقیقی و فراهم آوردن اطلاعات بهتر برای شبیه‌سازی عددی، نتایج دقیق‌تری به دست می‌آید. در سال ۲۰۱۵ آبراموویچ و همکاران [۱۳] پیش‌بینی بار کمانش به کمک روش همبستگی ارتعاشی را برای سه پنل ساخته شده به همراه یک پوسته استوانه‌ای بررسی

کردند، مبنای کار آن‌ها، رفتار پس‌کمانش پایدار و ناپایدار سازه‌ها بود. بر خلاف پوسته که دارای رفتار پس‌کمانشی ناپایدار می‌باشد، پنل‌ها دارای رفتار پس‌کمانشی پایدار هستند که اندازه‌گیری فرکانس طبیعی را تا اعمال بار به اندازه‌ی بار کمانش تجربی واقعی ممکن می‌سازد. جانسون و همکاران [۱۴] تلاش فراوانی برای بهبود روش همبستگی ارتعاشی انجام داده و اثرات غیرخطی وضعیت استاتیکی و نقایص هندسی را در نظر گرفته‌اند. برای غلبه بر کاستی‌های موجود برای برخی ساختارهایی نظیر پوسته‌ها که رفتار پس‌کمانشی ناپایدار دارند، یک روش جدید بر اساس روشی که توسط سوزا و همکاران [۱۵ و ۱۶] ارائه شد، معرفی گردید، در این روش از رابطه بین فشار محوری و فرکانس، پارامتر تجربی ناک دان (ξ^2) به دست می‌آید و به کمک آن بار کمانش محاسبه می‌شود. آربلو و همکاران [۱۷] و [۱۸] به مطالعه عددی و تجربی روش همبستگی ارتعاشی نوین پرداخته‌اند و دقت و برتری روش نوین را نسبت به روش سوزا نشان دادند. آن‌ها همچنین با اعمال شرایط مرزی واقعی برای یک ورق در مدل‌سازی عددی مشاهده کردند که دقت نتایج افزایش می‌یابد. کالنینس و همکاران [۱۹] اثر میزان نیروی اعمالی برای استفاده از روش همبستگی ارتعاشی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها دقت بسیار خوبی برای اعمال بار بیشتر از ۸۰ درصد بار کمانش را نشان می‌داد. چاوز وارگاز و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۵ به بررسی ارتباط بین مربع فرکانس با بار کمانش پرداختند و با استفاده از چهار مود اول ارتعاشی بار کمانش را برای سه ورق کامپوزیتی با تقویت‌کننده‌های طولی محاسبه نمودند. اسکوکیس و همکاران [۲۱] دو پوسته استوانه کامپوزیتی از جنس کرین-اپوکسی با انجام آزمایش آنالیز تجربی را مورد بررسی قرار دادند. همچنین اثر بازه‌ی بار اعمالی بر پیش‌بینی بار کمانش را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که برای بازه‌ی بین صفر تا ۶۵ درصد بار کمانش خطی، هم‌خوانی مناسبی بین بار کمانش تقریب زده شده و بار کمانش تجربی بحرانی وجود خواهد داشت. شاهقلیان و همکاران [۲۲] با استفاده از روش تجربی و عددی، کارایی روش همبستگی ارتعاشی برای محاسبه‌ی بار کمانش پوسته‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند و به خطای زیر ۳ درصد در پیش‌بینی بارکمانش به کمک آنالیز ارتعاشی غیرخطی رسیدند.

هدف تحقیق حاضر پیش‌بینی بار کمانش ورق کامپوزیتی تقویت شده با شبکه‌های مثلثی با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی

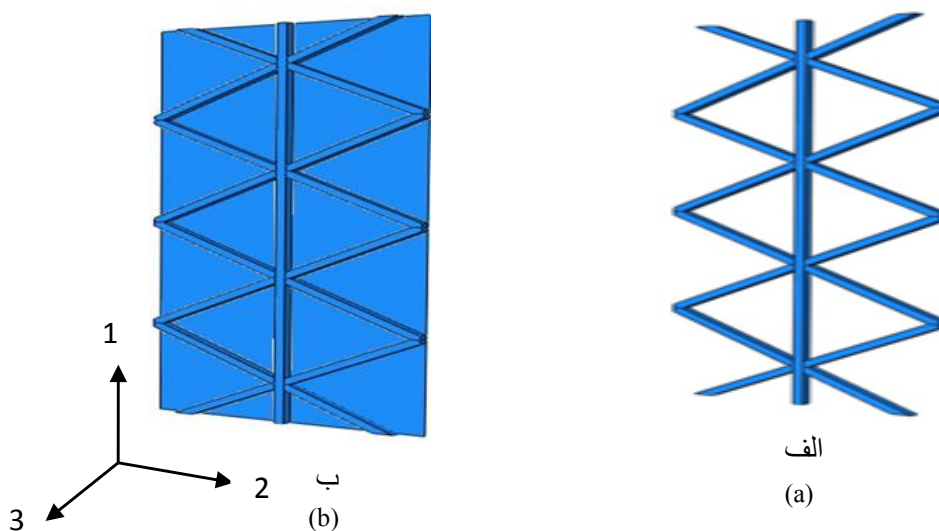
۲-۱- مدل سازی هندسی

نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک با ریب مثلثی می‌باشند. ابعاد آن‌ها 300×140 میلیمتر و ضخامت میانگین آن‌ها $1/75$ میلیمتر می‌باشد. ابعاد سطح مقطع تمامی ریب‌ها 5×5 میلی‌متر و زاویه ریب‌ها $\pm 60^\circ$ و درجه نسبت به سطح افقی می‌باشند. شبکه تقویت‌کننده در نرم افزار کتیا^۱ مدل شد. همچنین ورق چندلایه در محیط پارت^۲ نرم‌افزار آباکوس مدل شده است. با ترکیب این دو بخش در محیط اسمبلی^۳، ورق تقویت‌شده ایجاد می‌شود. در شکل ۱ شبکه‌ی تقویت‌کننده و ورق مشبک تقویت شده مشاهده می‌شوند. با توجه به اینکه در مدل واقعی برای اتصال ورق و شبکه تقویت‌کننده از چسب با مدول الاستیسیته بالا استفاده می‌شود، می‌توان این‌گونه فرض کرد که ورق و تقویت‌کننده در اتصال کامل نسبت به هم قرار داشته و هیچ‌گونه حرکت نسبی بین سطوح وجود ندارد، بنابراین از قید تای^۴ برای اتصال آن‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش با توجه به دوتب ایجاد شده در دو انتهای نمونه، نحوه‌ی قرارگیری نمونه در دستگاه تست فشار و نحوه‌ی اعمال بار، شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای دو لبه نمونه ساخته شده به صورت گیردار-گیردار می‌باشد و از همین شرط مرزی در مدل‌سازی استفاده نمود. هر شش درجه آزادی (سه انقالی و سه دورانی) لبه‌ی پایین نمونه مقید می‌شود و از بین شش درجه آزادی

می‌باشد. ابتدا شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها در نرم افزار المان محدود آباکوس صورت می‌پذیرد و به کمک آن آنالیز عددی ارتعاشات غیرخطی در مقادیر مختلف بار فشارمحوری انجام شده و فرکانس طبیعی در بارگذارهای مذکور بدست می‌آید. در مرحله بعد، به کمک روش همبستگی ارتعاشی مقدار بار کمانش بحرانی پیش‌بینی می‌گردد. در ادامه و برای صحت سنجی نتایج، سه 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 همبستگی ارتعاشی با نتایج تجربی بدست آمده مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۲- مطالعه‌ی عددی

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۱۴-۶ [۲۳] استفاده شده است که از جمله نرم‌افزارهای المان محدود بسیار کاربردی در این حوزه می‌باشد و در ادامه مراحل مختلف آن توضیح داده خواهد شد. همچنین این بسته نرم‌افزاری به خاطر قابلیت گسترده‌ای که در مدل‌سازی مواد مختلف و نیز توانایی سفارشی کردن آن به‌وسیله برنامه نویسی دارا می‌باشد، در محیط‌های تحقیقاتی هم بسیار مورد استفاده است.



شکل ۱- الف) شبکه تقویت‌کننده، ب) ورق مشبک تقویت شده
Fig. 1. (a) Grid (b) Grid-stiffened plate

- 1 Catia
- 2 Part
- 3 Assembly
- 4 Tie



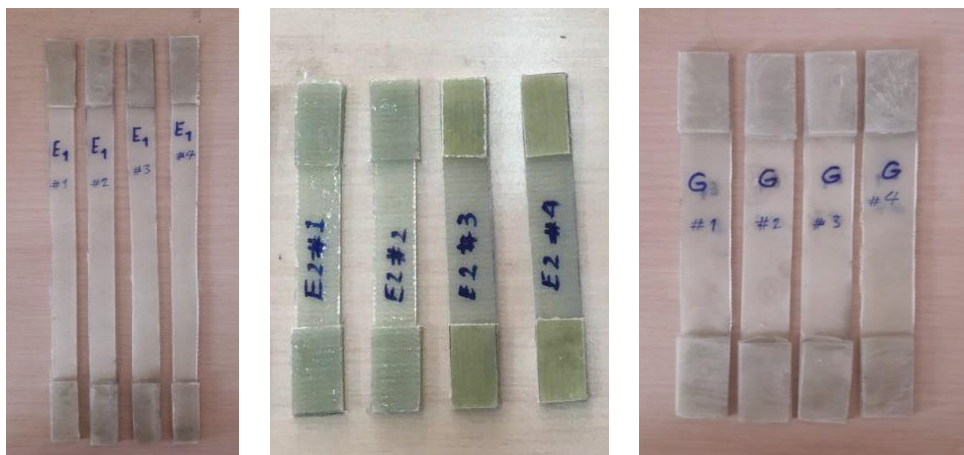
شکل ۳. تجهیزات و نحوه‌ی انجام تست خواص
Fig. 3. Equipment and procedure for properties test

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \quad (1)$$

در جدول ۱ خواص مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در تحلیل عددی نشان داده شده است. خواص ورق طبق مختصات ارائه شده در شکل ۱ اعمال می‌شود و در تقویت‌کننده‌ها یک مختصات محلی تعریف می‌شود به طوری که جهت ۱ همواره در راستای طولی تقویت‌کننده باشد.

۳-۲-المان بندی و همگرایی المان بندی

برای مش بندی شبکه تقویت‌کننده از المان‌های مکعبی سه بعدی^۳



شکل ۲. نمونه‌های تست خواص
Fig. 2. Specimens of properties test

نمونه در لبه‌ی بالایی، به دلیل حرکت فک دستگاه تنها حرکت انتقالی در راستای محوری مقید نمی‌شود.

۲-۲- خواص مکانیکی

برای محاسبه‌ی E_1 ، E_2 و G_{12} در ورق به ترتیب برطبق استاندارد ASTM D۳۰۳۹، ASTM D۳۴۱۰ و ASTM D۳۵۱۸ برای هر خاصیت چهار نمونه مطابق شکل ۲ ساخته شد. برای محاسبه‌ی خواص از دستگاه کشش INSTRON ۵۵۰۰R با Frame-۶۰۲۷ استفاده شد و برای بالا بردن دقت محاسبه‌ی کرنش نیز از اکستنسومتر^۱ ۵ سانتی‌متر ساخت شرکت اینسترون^۲ استفاده شد. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها و اکستنسومتر در دستگاه در شکل ۳ قابل مشاهده است. شکل ۲ نمونه‌های تست خواص را نشان می‌دهند. نمونه‌ها با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار می‌گیرند و نتایج حاصل در نمودارهای شکل‌های ۴ تا ۶ ارائه شده‌اند. خواص مورد نیاز برای تقویت‌کننده‌ها نیز با محاسبه‌ی خواص الیاف و رزین و محاسبه‌ی درصد حجمی هر جز در تقویت‌کننده با سوزاندن بخشی از نمونه در کوره، به کمک روابط میکرومکانیک [۲۴] محاسبه شد.

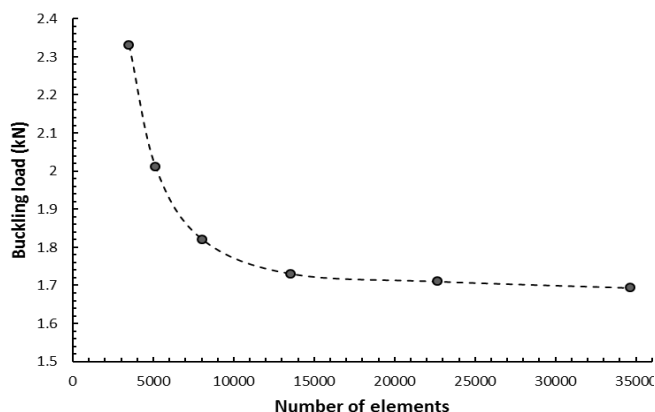
مقدار E_1 و E_2 برابر با شیب قسمت خطی نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ می‌باشند. و برای محاسبه‌ی G_{12} از رابطه (۱) [۲۴] استفاده می‌کنیم. در این رابطه E_x ، شیب قسمت خطی نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌های تحت آزمایش خارج از محور در شکل ۶ می‌باشد. همچنین ν_{12} ضریب پواسون و E_1 و E_2 مدول کششی نمونه‌ها در راستای طولی و عرضی هستند که در قسمت قبل محاسبه شدند.

جدول ۱- خواص تقویت کننده و ورق مکانیکی

Table 1. Mechanical properties of the skin and stiffeners

تقویت کننده	ورق	مشخصه	
۱۲۹۷	۱۳۷۷	ρ	چگالی (kg/m ³)
۱۳/۷۸	۱۷/۷۵	E_1	مدول الاستیسیته (GPa)
۴/۵۴	۵/۱۱	$E_2=E_3$	
۱/۶۷	۱/۶	$G_{12}=G_{13}$	مدول برشی (GPa)
۳/۴۹	۲/۳۶	G_{23}	
۰/۲۸۵	۰/۲۷۸	$U_{12}=U_{13}$	ضریب پواسون
۰/۱۳۵	۰/۰۸۵۴	U_{23}	

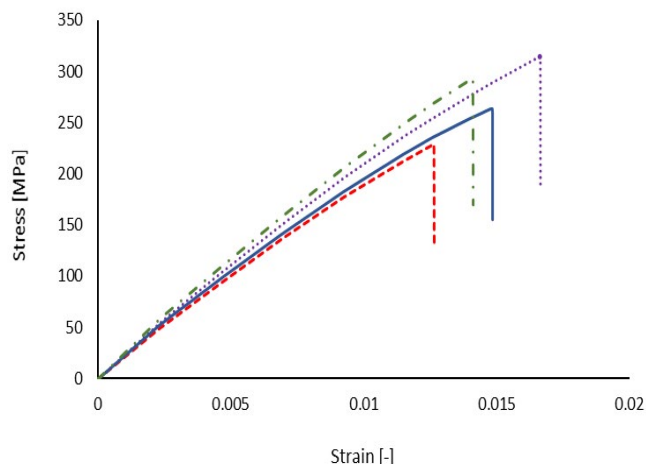
استفاده شده است و برای چندلایه کامپوزیتی از المان پوسته خطی استفاده شده است. به طور کلی برای اجزایی از سازه که بعد ضخامت از دو بعد دیگر به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر باشد، می‌توان از المان پوسته با مرتبه خطی^۱ استفاده کرد. برای به دست آوردن نتایج عددی با دقت بالا، باید مطالعه‌ی همگرایی مش انجام و سایز مناسب مش به دست آورده شود. در این تحقیق این کار با در نظر گرفتن ۶ حالت مختلف برای تعداد المان‌ها و سایز مش انجام شده است. در شکل ۷ تغییرات بارکمانش ورق تقویت‌شده با افزایش تعداد المان بررسی شده است و تعداد المان ۲۲۶۸۰ به عنوان تعداد المان بهینه به دست آمده است.



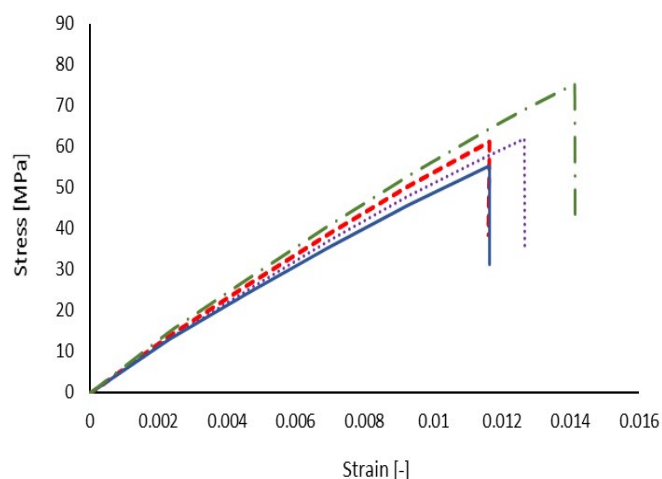
شکل ۷. مطالعه‌ی همگرایی مش
Fig. 7. Mesh convergence study

۴-۲- تعریف نوع حل و خروجی‌های مورد نظر

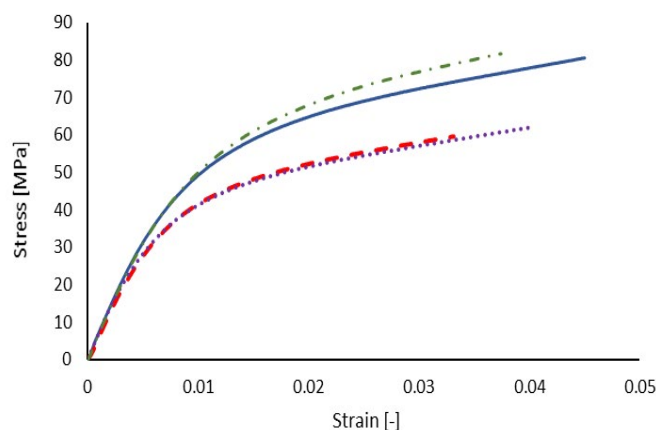
در این تحقیق ابتدا یک تحلیل کمانش خطی برای به دست آوردن بار کمانش خطی ورق کامپوزیتی تقویت‌شده بدون در نظر گرفتن



شکل ۴. نمودار تنش-کرنش برای محاسبه مدول یانگ طولی پارچه
Fig. 4. Stress-strain graph to calculate the longitudinal Young's Modulus of fabric



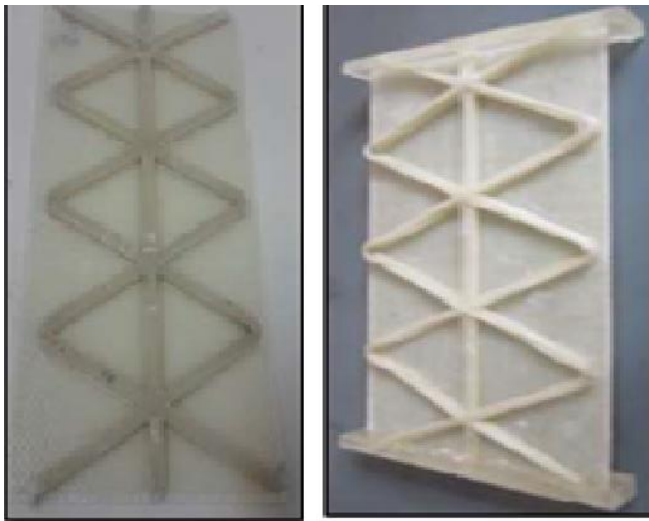
شکل ۵. نمودار تنش-کرنش برای مدول یانگ عرضی پارچه
Fig. 5. Stress-strain graph to calculate the transverse Young's Modulus of fabric



شکل ۶. نمودار تنش-کرنش برای G_{۱۲} پارچه
Fig. 6. Stress-strain graph to calculate the G₁₂ of fabric

قرار دادن الیاف درون شیپهای قالب سیلیکونی به کمک میخهای هدایت کننده و اضافه کردن همزمان رزین، شبکه تقویت کننده ایجاد می‌شود. بلافاصله با قراردادن لایه‌های الیاف پارچه‌ای بر روی شبکه تقویت کننده‌ها و آغشته نمودن هر لایه پارچه به رزین، ورق تقویت شده مشبک ساخته می‌شود. سپس هر نمونه تحت پرس قرار داده شده تا رزین به طور یکنواخت در نمونه پخش شده و همچنین حباب‌های هوای موجود در رزین نیز از آن خارج شود و کیفیت نمونه بالا رود. در نهایت نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شده تا کاملاً خشک و مناسب برای انجام آزمایش شوند.

برای اعمال شرایط مرزی و گیردار کردن دو لبه ورق‌ها، ابتدا دو نوار اپوکسی در لبه‌های بالایی و پایینی نمونه‌ها ایجاد شده است تا اجازه هرگونه جابجایی و دوران از لبه‌های پوسته ورق‌ها گرفته شود و مانع از کمانش محلی در لبه‌ها گردد و شرایط مرزی گیردار موردنظر به طور کامل اعمال گردد. بدین ترتیب لبه‌های بالایی و پایینی ورق به میزان ۵ میلی‌متر توسط نوار اپوکسی از داخل و خارج احاطه گشته‌اند تا شرایط مرزی گیردار مورد نظر به‌طور کامل اعمال گردد. در شکل ۸ شکل نهایی نمونه‌های ساخته شده آمده است.



شکل ۸: نمونه‌های ساخته شده
Fig. 8. The fabricated specimens

۴- رهیافت همبستگی ارتعاشی

برای استفاده از این روش ابتدا نیاز به محاسبه‌ی بار کمانش خطی عددی می‌باشد. اساس این روش بر پایه ارتباط بین مربع فرکانس

نقایص هندسی انجام شده است. برای محاسبه‌ی بار کمانش غیرخطی نیز از استپ استاتیک ریکس^۱ با اعمال ضریب نقص هندسی اولیه ۱۰ درصد ضخامت با کیبورد نویسی در مدل شبیه سازی شده اعمال می‌گردد. در ادامه تحلیل فرکانس غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات تغییرشکل‌های بزرگ و نقص هندسی اولیه، با کمک کیبورد نویسی در نرم‌افزار انجام می‌گیرد و با افزایش بار فشاری بر سازه میزان کاهش فرکانس طبیعی غیرخطی مشخص می‌گردد. لازم به توضیح می‌باشد که مقدار اختلاف در ضخامت‌های نمونه‌های ساخته شده نسبت به ماکزیمم ضخامت اندازه‌گیری شده ۱۰ درصد بود، بنابراین مقدار نقص هندسی ۱۰ درصد در تحلیل کمانش غیرخطی و تحلیل فرکانسی غیرخطی استفاده شد.

۳- ساخت نمونه تجربی

۳-۱- مواد مصرفی

در نمونه‌ها برای ماتریس از رزین CY۲۱۹ ساخت شرکت هانتسمن با چگالی 1100 kg/m^3 در دمای اتاق، استفاده شد. برای هاردنر نیز از HY۵۱۱۹ که با چگالی 1000 kg/m^3 در دمای اتاق مورد استفاده قرار گرفته شد. نسبت ترکیب رزین به هاردنر با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده ۲ به ۱ است. الیاف استفاده شده در ریب‌ها از جنس شیشه^۲ می‌باشد. همچنین برای پوسته از الیاف شیشه استفاده شد.

۳-۲- روش ساخت

برای ساخت سازه‌های تقویت شده روش‌های متفاوتی از جمله شکل‌دهی آزاد و رشته پیچی با کمک قالب‌های فلزی، فومی و سیلیکونی وجود دارد. روش شکل‌دهی آزاد از لحاظ اقتصادی مناسب ولی دارای دقت و کیفیت پایین می‌باشد. روش رشته پیچی با کمک قالب فلزی دارای دقت بالا و هزینه بالایی می‌باشد و قالب‌های فومی نیز یک‌بار مصرف و مناسب برای استفاده در صنعت می‌باشند. با توجه به در نظر گرفتن دو پارامتر مهم دقت و قیمت، در این پژوهش برای ساخت ورق‌های تقویت شده از روش رشته پیچی به کمک قالب سیلیکونی استفاده می‌شود. قالب سیلیکونی به کمک قالب پلکسی‌گلس^۳ ساخته شده و بر روی قالب چوبی قرار داده می‌شود. با

1 Static, Riks
2 E-Glass
3 Plexiglas

ارتعاشی در مقایسه با سایر روش‌های عددی پرداخته می‌شود.

۵-۱- بار کمانش خطی و غیرخطی

یکی از داده‌های مورد نیاز برای روش همبستگی ارتعاشی محاسبه ی بار کمانش خطی می‌باشد. در جدول ۲ بار کمانش خطی برای ۴ مود اول کمانش ورق تقویت‌شده با شبکه‌های مثلثی مشاهده می‌شود. همچنین با اعمال ضریب نقص هندسی اولیه با کیبورد نویسی در نرم‌افزار آباکوس میزان بار کمانش غیرخطی برای سازه‌ی مذکور kN ۱/۵۷ به دست می‌آید.

۵-۲- پیش بینی بار بحرانی کمانش با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی عددی

در این مرحله با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی و با انجام

جدول ۲. بار کمانش خطی
Table 2. The linear buckling load

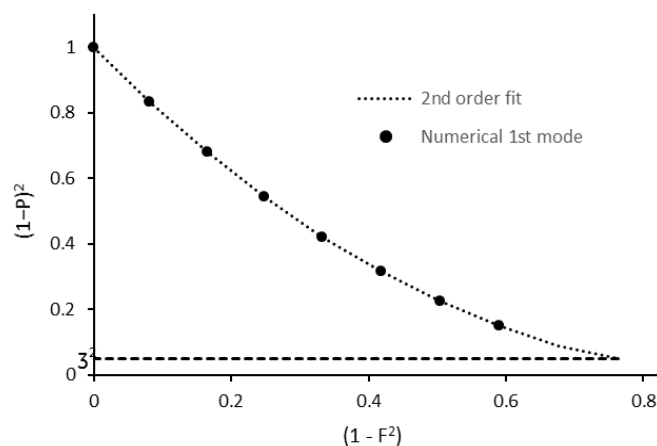
مد کمانشی	اول	دوم	سوم	چهارم
بار کمانش (kN)	۱/۷۱	۳/۱۹	۴/۱۱	۴/۸

تحلیل ارتعاشی غیرخطی، فرکانس طبیعی سازه‌های کامپوزیتی مذکور در بارهای فشاری مختلف به دست می‌آید. با افزایش بار فشاری بر روی ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده، میزان کاهش فرکانس طبیعی مشخص می‌گردد. تغییرات فرکانس طبیعی ورق کامپوزیتی مشبک با افزایش بار تا ۱/۳۵ کیلونیوتن برای پنج مود اول ارتعاشات در نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده برای مود اول ارتعاشی در شکل ۱۰ و استفاده از رابطه (۲)، بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی برابر ۱/۴۲ کیلونیوتن به دست می‌آید.

۵-۳- آزمون فشار محوری

سه ورق کامپوزیتی مشبک ساخته شده تحت آزمون فشار محوری قرار گرفتند تا مقدار بار کمانش بحرانی تجربی سازه به دست آید و با بار کمانش پیش‌بینی شده به روش همبستگی ارتعاشی مقایسه گردد. برای اعمال بار محوری بر روی سازه‌های ساخته شده از دستگاه یونیورسال Shijin wdw.۳۰۰e استفاده گردید که توانایی اعمال بار تا ۱۰۰ کیلونیوتن را دارد. دستگاه در حالت کنترل جابجایی

و بارکمانش سازه است. در این پژوهش برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش همانند مرجع [۱۷] از روش همبستگی ارتعاشی نوین استفاده می‌شود، به این ترتیب که مقادیر فرکانس طبیعی غیرخطی سازه را در بارهای فشاری مختلف محاسبه می‌کنیم. برای این منظور، ابتدا مقادیر $(1-P)^2$ بر حسب $(1-F^2)$ ترسیم می‌شود، که در آن $P = \frac{P}{P_{cr}}$ و $F = \frac{f_m}{f_0}$ 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. سپس نقاط مختلف با استفاده از یک برازش درجه دو به یکدیگر مرتبط می‌گردند. مقدار حداقل $(1-P)^2$ به دست آمده از برازش منحنی، اندازه ξ^2 را ارائه می‌دهد. ξ^2 ظرفیت تحمل افت بار است که با پارامتر ناک‌دان در ارتباط است و نحوه به دست آمدن آن در شکل ۹ نشان داده شده است.



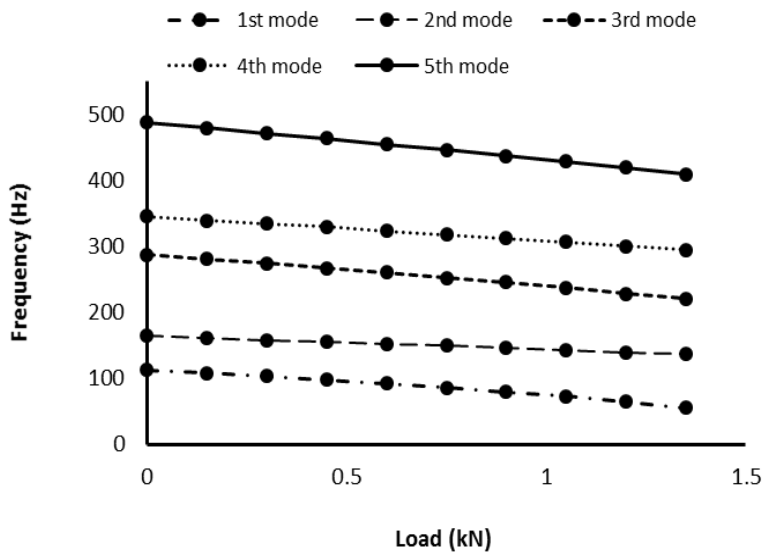
شکل ۹: نمودار $(1-P)^2$ بر حسب $(1-F^2)$
Fig. 9. The plot of $(1-P)^2$ versus $(1-F)^2$

در ادامه به کمک رابطه (۱) که از مرجع [۱۷] استخراج شده است، مقدار بار کمانش پیش‌بینی شده به دست می‌آید. در این رابطه مقدار P_{cr} برابر با بار کمانش خطی است که از تحلیل خطی بار کمانش در نرم‌افزار آباکوس به دست آمده است. در نتیجه با جاگذاری مقادیر P_{cr} و ξ^2 در رابطه (۲) مقدار P_{VCT} که همان بار کمانش پیش‌بینی شده به روش همبستگی ارتعاشی می‌باشد، به دست می‌آید.

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

۵-۴- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج به دست آمده از قسمت‌های مختلف شبیه‌سازی عددی ارائه می‌شود و در نهایت با انجام تست فشار و مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی به میزان کارایی روش همبستگی



شکل ۱۰. فرکانس غیرخطی عددی در بارهای فشاری مختلف
Fig. 10. The nonlinear frequencies at the different levels of the applied compressive load

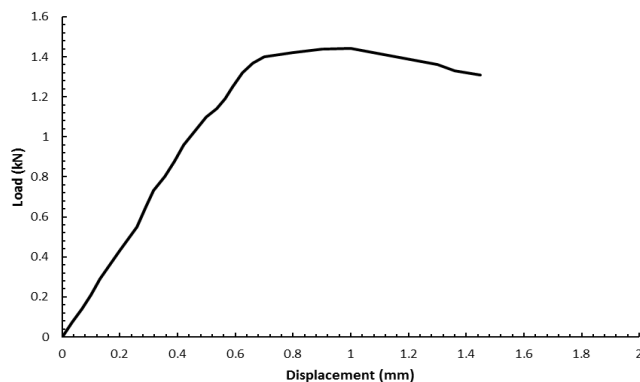
تست فشار را نشان می‌دهد. بار کمانش تجربی نمونه‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳. نتایج تجربی
Table 3. Experimental results

میانگین	سوم	دوم	اول	نمونه
۱/۴۸	۱/۵۵	۱/۴۶	۱/۴۴	بار کمانش (kN)

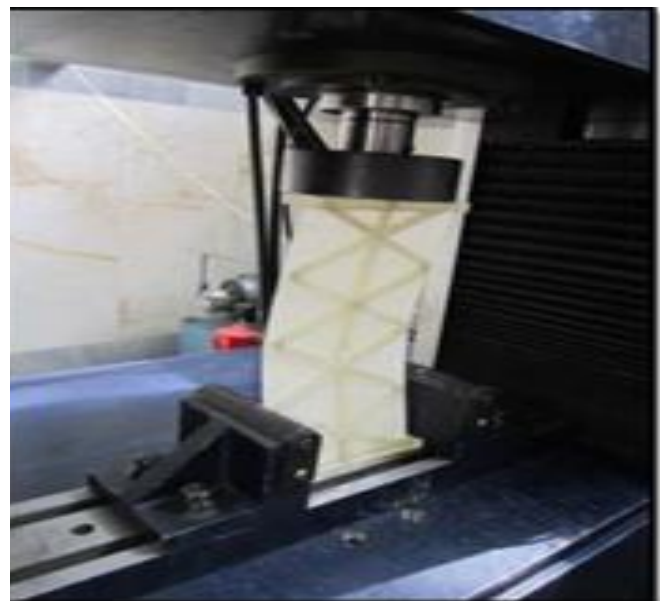
۴-۵- مقایسه نتایج پیش بینی شده با نتایج تجربی به دست آمده

در این قسمت به بررسی کارایی روش همبستگی ارتعاشی پرداخته می‌شود. و نتایج به دست آمده از این روش با نتایج به دست آمده از تست تجربی مقایسه می‌گردد تا کارایی و بازدهی روش مذکور مورد



شکل ۱۲. نمودار نیرو-جابجایی نمونه اول
Fig. 12. The load-displacement graph of the first specimen

تنظیم شده و اعمال بار توسط حرکت سینی متحرک دستگاه با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه صورت می‌گیرد. برای تنظیم و مشخص شدن دقت دستگاه و تنظیم بودن آن در حین بارگذاری از نمونه‌های استاندارد که در دسترس قرار داشت استفاده شد و قبل از شروع بارگذاری از صحت عملکرد دستگاه اطمینان حاصل شده و در واقع دستگاه کالیبره شد. بارگذاری محوری تا یافتن بار بحرانی کمانش و خرابی نمونه ادامه می‌یابد. شکل ۱۱ نمونه قرار گرفته داخل دستگاه تست فشار و شکل ۱۲ نمودار نیرو-جابجایی خروجی از دستگاه



شکل ۱۱. تست کمانش تجربی
Fig. 11. The experimental buckling test

جدول ۴. نتایج نیروی بحرانی کمانش
Table 4. Buckling critical load results

اختلاف از بار بحرانی تجربی (%)	بار بحرانی کمانش (kN)	
-	۱/۴۸	P_{Exp}
۱۵/۵	۱/۷۱	P_{Linear}
۶/۱	۱/۵۷	$P_{Nonlinear}$
۴/۱	۱/۴۲	P_{VCT}

مختلف فرکانس طبیعی در بازه‌های مختلف بار فشاری به پیش‌بینی بار کمانش می‌پردازیم. با در نظر گرفتن بازه‌های متفاوت بار فشاری از ۳۵ درصد تا ۷۹ درصد بار کمانش خطی، مقادیر بار کمانش پیش‌بینی شده و درصد اختلاف از میانگین نتایج تجربی در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد. در این جدول درصد بار اعمالی، نسبت بار اعمالی نسبت به بار کمانش خطی سازه می‌باشد. طبق نتایج برای بازه‌ی بیش از ۵۰ درصد، خطای پیش‌بینی به کمتر از ۷ درصد می‌رسد. همچنین با افزایش بازه‌ی بار اعمالی دقت نتایج بیشتر می‌شود. باید توجه داشت که ۷۹ درصد بار کمانش خطی برابر با ۹۲ درصد بار کمانش تجربی سازه می‌باشد، بنابراین اعمال بار بیش‌تر از این مقدار احتمال خرابی سازه را به همراه خواهد داشت.

۶- نتیجه‌گیری

سازه‌های کامپوزیتی مخصوصاً سازه‌های کامپوزیتی مشبک به دلیل استحکام بالا، وزن پایین و خواص مکانیکی ایده‌آل دارای کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلفی نظیر هوافضا، دفاعی، سازه‌های دریایی و اتومبیل می‌باشند. برای طراحی سازه‌های مختلف تحلیل‌هایی نظیر تحلیل استاتیکی، دینامیکی، ارتعاشی، شکست و کمانشی انجام می‌شود. از آنجایی که سازه‌های جدار نازک عموماً تحت بارهای فشاری قرار می‌گیرند، آنالیز کمانش یکی از مهمترین تحلیل‌های

بررسی قرار گیرد. در این قسمت بازه‌ی بار اعمالی برای پیش‌بینی بار کمانش، ۶۱ درصد بار کمانش خطی در نظر گرفته شده است. در جدول ۴، P_{EXP} ، میانگین بار کمانش تجربی، P_{Linear} ، بار کمانش خطی عددی، $P_{Nonlinear}$ ، بار کمانش غیرخطی عددی و P_{VCT} ، بار کمانش پیش‌بینی شده به کمک روش همبستگی ارتعاشی می‌باشد. طبق جدول ۴ خطای اختلاف بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از رهیافت همبستگی ارتعاشی با بار کمانش تجربی به دست آمده از آزمون فشار محوری کمتر از ۵ درصد می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که روش همبستگی ارتعاشی برای پیش‌بینی بار بحرانی کمانش روش مناسبی می‌باشد. در واقع بدون اینکه به سازه مورد نظر آسیب جدی وارد شود و بطور کامل تخریب گردد، می‌توان با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی بار بحرانی کمانش آن سازه را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود.

۵-۵- بررسی اثر بازه‌های فشاری بر دقت روش همبستگی ارتعاشی

با توجه به اینکه دقت پیش‌بینی روش همبستگی ارتعاشی وابسته به انتخاب بازه‌ی فشاری می‌باشد، بنابراین بررسی اثر بازه‌های فشاری بر دقت پیش‌بینی روش همبستگی ارتعاشی بسیار مهم می‌باشد. برای پیدا کردن محدوده مناسب بار فشاری، با در نظر گرفتن مقادیر

جدول ۵- بررسی اثر بازه‌های فشاری
Table 5. Investigation of the effect of the compressive range

درصد خطا $[(P_{VCT}-P_{Exp})/P_{VCT}]*100$	P_{VCT}	درصد بار اعمالی $(P/P_{Linear} \times 100)$
۱۱,۳	۱,۳۳۱	۳۵
۸,۸	۱,۳۵	۴۴
۶,۱	۱,۳۹	۵۳
۴,۱	۱,۴۲	۶۱
۲,۱	۱,۴۵	۷۹

فهرست علائم

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 ناکدان
ρ	چگالی، kg/m ³
v	ضریب پواسون

زیرنویس

θ	بدون نیروی محوری
cr	بحرانی
m	با نیروی محوری

منابع

- [1] D.R. Ambur, L.W. Rehfield, Effect of stiffness characteristics on the response of composite grid-stiffened structures, *Journal of Aircraft*, 30(4) (1993) 541-546.
- [2] O. Hughes, B. Ghosh, Y. Chen, Improved prediction of simultaneous local and overall buckling of stiffened panels, *Thin-Walled Structures*, 42(6) (2004) 827-856.
- [3] P.A.Lara, R.H. Gutierrez, H.C. Sanzi, G. Elvira, buckling of circular, solid and annular plates with on intermediente circular support, 27 (2000) 749-755.
- [4] J. He, M. Ren, S. Sun, Q. Huang, X. Sun, Failure prediction on advanced grid stiffened composite cylinder under axial compression, *Composite Structures*, 93(7) (2011) 1939-1946.
- [5] Y. Chen, R.F. Gibson, gds, Vibration Characteristics of Composite Isogrid Structures, (20).
- [6] M. Hemmatnezhad, G.H. Rahimi, M. Tajik, F. Pellicano, Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells, *Composite Structures*, 120 (2015) 509-518.

خرابی این نوع سازه‌ها می‌باشد. در دهه‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای پیش‌بینی بارکمانش پوسته‌های کامپوزیتی انجام شده است. یکی از روش‌های غیرمخرب ارائه شده برای پیش‌بینی بارکمانش، روش همبستگی ارتعاشی است، که در واقع پل ارتباطی بین کمانش و ارتعاشات می‌باشد و با استفاده از این روش، بدون شکست، خرابی و رسیدن به ناپایداری، می‌توان بار کمانش سازه را پیش‌بینی نمود. در این تحقیق بارکمانش بحرانی ورق کامپوزیتی تقویت شده با شبکه‌ی مثلثی با کمک روش همبستگی ارتعاشی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس برای محاسبه‌ی بارکمانش خطی و غیرخطی و نیز تحلیل ارتعاشی در مقادیر مختلف بار فشاری انجام شد. سپس به کمک روش همبستگی ارتعاشی، بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شد. در نهایت برای بررسی و صحت سنجی نتایج پیش‌بینی شده نمونه‌های تجربی ساخته شدند و تحت آزمایش فشار قرار گرفته شدند. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق عبارتند از:

- ۱- بار بحرانی کمانش پیش‌بینی شده با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی ۱/۴۲ کیلونیوتن برای بازه‌ی فشاری ۸۰ درصد بار تجربی به‌دست آورده شد. همچنین بار کمانش تجربی به‌دست آمده برابر ۱/۴۸ کیلونیوتن به دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، اختلاف نتایج پیش‌بینی شده روش همبستگی ارتعاشی با نتایج تجربی برابر ۲/۱ درصد می‌باشد. که این موضوع دال بر مناسب بودن روش همبستگی ارتعاشی برای پیش‌بینی نتایج با دقت بسیار بالا برای ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده می‌باشد.
- ۲- روش همبستگی ارتعاشی روش مناسبی برای پیش‌بینی بار کمانش بحرانی ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده 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 ۴۵ درصد بار تجربی، می‌تواند نتایجی با دقت بالا و خطای کمتر از ۱۰ درصد، برای ورق‌های کامپوزیتی تقویت شده به دست آورد.

- prediction of buckling loads from nondestructive vibration tests, *Experimental Mechanics*, 31(2) (1991) 93-97.
- [17] M.A. Arbelo, K. Kalnins, O. Ozolins, E. Skukis, S.G.P. Castro, R. Degenhardt, Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using a vibration correlation technique, *Thin-Walled Structures*, 94 (2015) 273-279.
- [18] M.A. Arbelo, S.F.M. de Almeida, M.V. Donadon, S.R. Rett, R. Degenhardt, S.G.P. 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*, 79 (2014) 119-128.
- [19] K. Kalnins, M.A. Arbelo, O. Ozolins, E. Skukis, S.G.P. Castro, R. Degenhardt, Experimental Nondestructive Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells Using Vibration Correlation Technique, *Shock and Vibration*, 2015 (2015) 1-8.
- [20] M. Chaves-Vargas, A. Dafnis, H.G. Reimerdes, K.U. Schröder, Modal parameter identification of a compression-loaded CFRP stiffened plate and correlation with its buckling behaviour, *Progress in Aerospace Sciences*, 78 (2015) 39-49.
- [21] E. Skukis, O. Ozolins, K. Kalnins, M.A. Arbelo, Experimental Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical shells by Vibration Correlation Technique, *Procedia Engineering*, 172 (2017) 1023-1030.
- [22] D. Shahgholian-Ghahfarokhi, M.-R. Raafat, G.-H. Rahimi, Prediction of the critical buckling load of composite cylindrical shells by using Vibration Correlation Technique, *Journal of Science and Technology of Composites*, 5 (2016) 120-130.(In persian)
- [23] Abaqus, C.A.E., User's manual, Abaqus Anal. user's Man., 2016.
- [24] Gibson, R.F, Principles of composite material mechanics. CRC press, 2016.
- [7] D. Shahgholian-Ghahfarokhi, A. Ghanadi, G.H. Rahimi, Experimental and numerical investigation of the free vibration of composite sandwich plates with lattice cores, *Modares Mechanical Engineering*, 3(2017) 160-170.(In persian)
- [8] Lurie H. Lateral vibration as related to structural stability. *J Appl Mech*, ASME 1952;19:195-204 (June).
- [9] A. Chailleux, Y. Hans, G. Verchery, Experimental study of the buckling of laminated composite columns and plates, *International Journal of Mechanical Sciences*, 17(8) (1975) 489-IN482.
- [10] Abramovich H, Gil J, Grunwald A, Rosen A. Vibration and buckling of radially loaded circular plates, TAE report 332. Haifa, Israel: Department of Aeronautical Engineering, Technion - Israel Institute of Technology; 1975 (July).
- [11] J. Singer, J. Arbocz, T. Weller, Buckling experiments, shells, built-up structures, composites and additional topics, John Wiley & Sons, 1998.
- [12] C. Hühne, R. Zimmermann, R. Rolfes, B. Geier, Sensitivities to geometrical and loading imperfections on buckling of composite cylindrical shells, in: *Proceedings European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing*, Toulouse, 2002.
- [13] H. Abramovich, D. Govich, A. Grunwald, Buckling prediction of panels using the vibration correlation technique, *Progress in Aerospace Sciences*, 78 (2015) 62-73.
- [14] Jansen, E.L, Abramovich, H. and Rolfes, R., The direct prediction of buckling loads of shells under axial compression using VCT— towards an upgraded approach, in *Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2014.
- [15] M. Souza, W. Fok, A. Walker, Review of Experimental Techniques for Thin-walled Structures Liable to Buckling: Neutral and Unstable Buckling, experimental techniques, 7(9) (1983) 21-25.
- [16] M. Souza, L. Assaid, A new technique for the

