



بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد ورق‌های کامپوزیتی ساندویچی با هسته مشبک

داود شاهقلیان قهفرخی¹، احمد قنادی²، غلامحسین رحیمی^{3*}

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

2 دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

* تهران، صندوق پستی 14115-111، rahimi_gh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 خرداد 1396

پذیرش: 30 مرداد 1396

ارائه در سایت: 07 مهر 1396

کلید واژگان:

ارتعاشات آزاد

ورق کامپوزیتی ساندویچی

هسته مشبک شکل

ساخت

روش تاگوچی

چکیده

سازه‌های مشبک کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر بفردشان، یکی از سازه‌های پرکاربرد در صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی می‌باشد. در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی کامپوزیتی با شبکه مثلثی پرداخته شده است. برای ساخت این ورق‌ها، از قالب سیلیکونی، روش رشته‌پیچی و لایه‌چینی دستی استفاده شده است. ورق تقویت شده مشبک و ورق چندلایه ساخته شده و سپس با چسباندن این دو بخش بهم، ورق ساندویچی با شبکه مثلثی ایجاد شده است. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش آنالیز مودال قرار گرفته و فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات استخراج شده است. از حل عددی و مقایسه با نتایج تجربی مشاهده شد که انطباق مناسبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. با استفاده از روش تاگوچی یک مطالعه پارامتری روی اثر تغییرات 3 پارامتر، شامل تعداد تقویت‌کننده، ضخامت تقویت‌کننده و ضخامت پوسته بر رفتار ارتعاشی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد، فرکانس طبیعی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی بیشترین حساسیت را نسبت به ضخامت تقویت‌کننده و کمترین حساسیت را نسبت تعداد تقویت‌کننده دارد. حساسیت فرکانس طبیعی نسبت به ضخامت تقویت‌کننده و ضخامت پوسته تقریباً یکسان است. همچنین برای بررسی کارایی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی، فرکانس طبیعی این سازه با ورق چندلایه معادل در شرایط مرزی مختلف مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد فرکانس طبیعی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی در حالت شرط مرزی آزاد، 313% و در حالت شرط مرزی گیردار، 138% نسبت به ورق چندلایه معادل بیشتر است.

Experimental and numerical investigation of the free vibration of composite sandwich plates with lattice cores

Davoud Shahgholian Ghahfarokhi, Ahmad Ghanadi, Gholam Hossein Rahimi*

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 15 June 2017

Accepted 21 August 2017

Available Online 29 September 2017

Keywords:

Free vibration

Composite sandwich plate

Triangular cores

Fabrication

Taguchi method

ABSTRACT

Due to unique properties, lattice composite structures are used extensively in aviation, marine and automotive industry. In this research, experimental and numerical investigation of the free vibration of composite sandwich plates with triangular grid has been studied. For the fabrication of these plates, silicone mold, filament winding, and hand lay-up method were used. Stiffened plates and simple plates are fabricated, separately. Then, composite sandwich plates with triangular grid were created by attaching the two parts together. The modal test is done on the plates and natural frequencies have been extracted. The comparison of numerical and experimental results showed that there is a good agreement between them. By using Taguchi method, a parametric study was performed on the vibrational behavior of sandwich plates with triangular cores via three parameters such as stiffeners' number, stiffener thickness and skin thickness. The results show that the natural frequency of sandwich plates with triangular grid are the most sensitivity to the stiffener thickness, and least sensitive to stiffeners' number. The sensitivity of natural frequency is almost identical to stiffener thickness and skin thickness. To evaluate the efficiency of sandwich plates with triangular grid, the natural frequency of sandwich plates is compared with simple plates in the different boundary condition. The results show that the natural frequency of sandwich plates with the triangular grid is 133% and 138% higher than an equivalent simple shell at free and clamp boundary condition, respectively.

1- مقدمه

بخصوص سازه‌های مشبک کامپوزیتی مورد توجه طراحان و مهندسان قرار گرفته است. سازه‌های مشبک کامپوزیتی نسبت به سازه کامپوزیتی معمولی دارای استحکام و سفتی نسبت به وزن بالاتری بوده و همچنین مقاومت بیشتری در برابر خستگی و ضربه از خود نشان می‌دهد. ساختارهای مشبک از

در دهه‌های اخیر با توجه به نیاز روزافزون صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی، هوافضا و خودروسازی به ارتقای خواص مکانیکی سازه‌ها از جمله استحکام و سفتی به همراه افزایش وزن پایین، سازه‌های کامپوزیتی و

Please cite this article using:

D. Shahgholian Ghahfarokhi, A. Ghanadi, Gh. H. Rahimi, Experimental and numerical investigation of the free vibration of composite sandwich plates with lattice cores, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 1-8, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مخروطی پرداخت. فان و همکاران [11,10] به بررسی عددی و تجربی رفتار کمانشی و ارتعاشی پوسته ساندویچی استوانه‌ای با هسته مشبک پرداختند. آن‌ها با استفاده از قالب فلزی و روش رشته پیچی پوسته ساندویچی با هسته مشبک را ساختند. آن‌ها همچنین به مقایسه فرکانس اصلی این سازه ساندویچی با سازه تقویت‌شده هم‌وزن پرداختند و نشان دادند در بازه کاربردهای مهندسی، پوسته ساندویچی فرکانس اصلی بسیار بهتری دارد و می‌توان سازه‌های هوایی را به‌صورت سبک‌تر ساخت و فرکانس مورد نیاز را تأمین کرد. ژانگ و همکاران [13,12] به منظور تحلیل سازه‌های مشبک بر اساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول، از المان صفحه‌ای تقویت شده مثلثی شکل استفاده کردند. همچنین بر اساس مدل المان تقویت شده مثلثی، شبیه‌سازی و پیشرفت مدهای شکست چندگانه صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده را توسعه دادند و رفتار کاهش خواص ماده پس از شروع مکانیزم‌های شکست نیز معرفی شد. خسروی و اسلامی [1] به بررسی اثر افزودن نانو سیلیکای اصلاح شده سطحی بر رفتار خمشی و جذب انرژی ورق‌های مشبک کامپوزیتی با شبکه مثلثی پرداختند و نشان دادند که با افزودن 3% نانو سیلیکا استحکام خمشی 14% و جذب انرژی ویژه سازه، 25% افزایش می‌یابد. شاهقلیان و همکاران [15,14] به بررسی تجربی و عددی شکل تقویت‌کننده‌ها بر رفتار خمشی ورق کامپوزیتی مشبک پرداختند و نشان دادند، ورق کامپوزیتی مشبک با شبکه مربعی بیشترین استحکام و سفتی خمشی نسبت به وزن را ایجاد می‌کند. همچنین استحکام خمشی ویژه ورق با شبکه مثلثی بیشتر از ورق با شبکه لوزی است و سفتی خمشی ویژه ورق با شبکه لوزی بیشتر از ورق با شبکه مثلثی می‌باشد. آن‌ها همچنین به بررسی اثر تقویت‌کننده طولی و عرضی بر رفتار خمشی ورق مشبک کامپوزیتی پرداخته و نشان دادند، تقویت‌کننده طولی اثر بسیار زیادی بر استحکام خمشی ورق مشبک دارد، به طوری که با افزودن تقویت‌کننده طولی به ورق مشبک با شبکه لوزی، و ایجاد شبکه مثلثی، استحکام خمشی تقریباً شش برابر می‌شود. تقویت‌کننده‌های عرضی نیز با افزایش وزن سازه منجر کاهش استحکام و سفتی مخصوص می‌شود.

در این تحقیق به منظور دستیابی به فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات که پارامتر اصلی در طراحی سازه بر مبنای سفتی می‌باشد، به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی با شبکه مثلثی پرداخته خواهد شد. ورق تقویت شده با استفاده از قالب سیلیکونی و روش رشته پیچی ساخته می‌شود. سپس با چسباندن ورق چندلایه کامپوزیتی به ورق تقویت شده، ورق ساندویچی با هسته مشبک ساخته شده و تحت آزمایش مودال قرار می‌گیرد. به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر تغییر برخی از پارامترهای هندسی سازه شامل تعداد ریب، ضخامت ریب و ضخامت پوسته بر ارتعاشات ورق ساندویچی با هسته مشبک بررسی خواهد شد. همچنین به جهت بررسی کارایی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی، به مقایسه فرکانس طبیعی این ورق ساندویچی با ورق چندلایه هم‌وزن پرداخته خواهد شد.

2- هندسه مسأله

سازه‌های کامپوزیتی مورد بررسی در این تحقیق، از دو ورق چندلایه کامپوزیتی که در بالا و پایین شبکه‌ای از تقویت‌کننده‌ها قرار گرفته، تشکیل شده است. سازه‌های مشبک معمولاً از تکرار تعدادی سلول واحد تشکیل شده که استحکام سازه رابطه مستقیمی با این واحدها دارد. محل برخورد تقویت‌کننده‌ها گره نامیده می‌شود [14]. در شکل 2 شماتیکی از ورق ساندویچی با شبکه مثلثی شکل نشان داده شده است. ابعاد ورق‌های

بهم پیوستن مجموعه‌ای از تقویت‌کننده‌ها به صورت پیوسته تشکیل می‌شوند. تقویت‌کننده‌ها از الیاف پیوسته، چقرمه، سفت و مستحکم تشکیل شده‌اند. در شکل 1 [1] نمونه‌ای از ورق مشبک کامپوزیتی نشان داده شده است. ورق‌های ساندویچی کامپوزیتی از دیگر ساختارهای مشبک کامپوزیتی هستند. این سازه‌ها از دو رویه چندلایه کامپوزیتی و شبکه‌ای از تقویت‌کننده‌ها به عنوان هسته تشکیل شده‌اند.

در سال‌های اخیر تحلیل‌های مختلفی روی ورق‌های مشبک کامپوزیتی انجام شده است. هوسومورا و همکاران [2] به بررسی واماندگی ورق مشبک با شبکه مثلثی پرداختند و نشان دادند که افزایش استحکام و سفتی سازه مشبک کامپوزیتی نسبت به سازه فلزی فقط در جهت الیاف می‌باشد.

کیم [3] به ساخت پوسته تقویت شده با روش رشته پیچی پرداخت و از قالب سیلیکونی برای ساخت تقویت‌کننده استفاده کرد. هیبرچت [4] با استفاده از روش هیبرید تولینگ¹ مساله کوبش و بهم فشردگی تقویت‌کننده را حل کرد. با توجه به محدودیت ضخامت تقویت‌کننده در این روش، وی برای سازه با ضخامت‌های بزرگ از روش اکسپنشن بلوک² استفاده کرد. به این صورت که بلوک‌هایی روی صفحه پایه نصب شده و بین این بلوک‌ها مسیر ایجاد تقویت‌کننده تشکیل می‌شود. این بلوک‌ها در فواصل خاصی نسبت به هم قرار می‌گیرند و الگوهای مختلف مشبک با ضخامت‌های مختلف ایجاد می‌شود. چن و گیسون [5] با استفاده از روش المان محدود به آنالیز مودال پل‌های کامپوزیتی مشبک پرداختند و نشان دادند شکل مود ارتعاشی پل کامپوزیتی مشبک با پل آیزوتروپ یکسان می‌باشد. جاده‌او و همکاران [7,6] به بهینه‌سازی هندسی ورق مشبک کامپوزیتی با شبکه مثلثی شکل، تحت بار جانبی شبه استاتیکی و بار دینامیکی ضربه سرعت بالا به روش المان محدود پرداختند. همچنین مشخصات جذب انرژی ورق مشبک کامپوزیتی با شبکه مثلثی را تحت بار خمشی سه نقطه انجام داده و نشان دادند که بارگذاری در راستای تقویت‌کننده‌ها نسبت به بارگذاری در راستای پوسته منجر به جذب انرژی مخصوص و جابجایی بزرگ‌تر می‌شود. رحیمی و همت‌نژاد [8] به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده مشبک پرداختند. همچنین با استفاده از روش معادل‌سازی، به معادل‌سازی سفتی تقویت‌کننده پرداخته و فرکانس طبیعی پوسته استوانه‌ای تقویت شده را به‌صورت تئوری بدست آوردند. همچنین زارعی [9] با استفاده از روش معادل‌سازی به استخراج فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده



Fig. 1 Lattice composite plate [1]

شکل 1 ورق کامپوزیتی مشبک [1]

¹ Hybrid tooling

² Expansion block

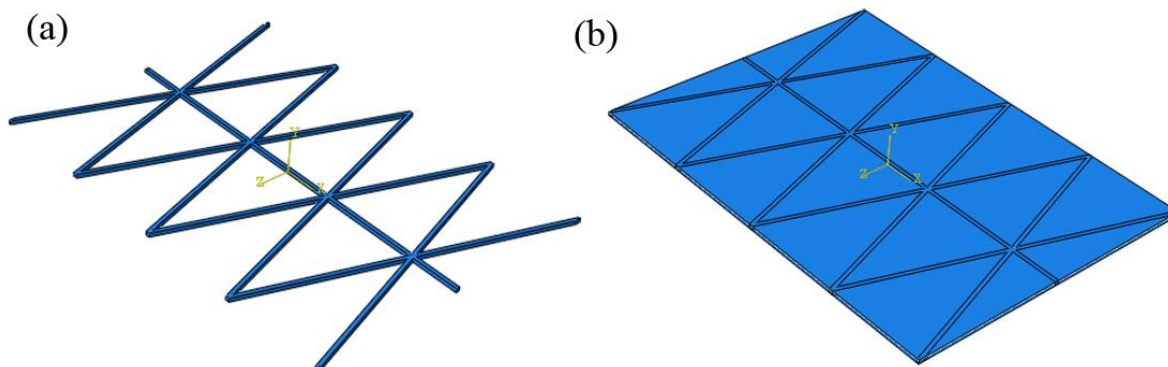


Fig. 2 (a) Lattice core (b) sandwich plate with lattice core

شکل 2 شبکه تقویت‌کننده‌ها- ورق ساندویچی با هسته مشبک



(a)



(b)

Fig. 3 (a) plexi glass mold (b) silicon mold

شکل 3 قالب پلکسی گلس- قالب سیلیکونی

الیاف پس از قرار گرفتن درون شیار قالب سیلیکونی، با پیچیده شدن دور میخ‌های قالب چوبی، به سمت شیار بعدی هدایت می‌شوند. عملیات پیچش الیاف تا پرشدن شیارها از الیاف و رزین ادامه می‌یابد. بلافاصله با قرار دادن لایه‌های پارچه‌های کامپوزیتی بر روی شبکه تقویت‌کننده‌ها و آغشته کردن هر لایه پارچه به رزین، ورق تقویت‌شده مشبک ساخته می‌شود. سپس روی نمونه وزنه قرار داده می‌شود 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. سپس نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای محیط قرار داده می‌شود تا کاملاً خشک شوند. برای ساخت ورق ساندویچی نیاز به ساخت ورق چندلایه نیز می‌باشد. ورق چندلایه به صورت لایه‌چینی دستی

ساندویچی 300×240 میلی‌متر می‌باشد. ابتدا با یک نوع شبکه بندی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده و آزمون مودال روی آن‌ها انجام شده است. سپس با استفاده از مدل طراحی آزمایش تاگوچی به مطالعه پارامتری ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی با شبکه مثلی برای سه نوع شبکه‌بندی مختلف با ابعاد و تعداد تقویت‌کننده متفاوت و همچنین ضخامت پوسته متفاوت پرداخته شده است.

3- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

روش‌های مختلفی برای ساخت سازه مشبک کامپوزیتی وجود دارد. می‌توان برای ایجاد شبکه تقویت‌کننده از روش شکل‌دهی آزاد استفاده کرد. این روش هزینه پایی داشته و منجر به کیفیت پایین تقویت‌کننده‌ها می‌شود [15]. همچنین از قالب فلزی، قالب فومی و قالب سیلیکونی نیز برای ساخت شبکه تقویت‌کننده‌ها به روش رشته‌پیچی استفاده می‌شود. قالب‌های فلزی از دقت بسیار بالایی برخوردارند، اما هزینه ساخت بالایی نیز دارند. قالب‌های فومی نیز به صورت یکبار مصرف می‌باشند. بنابراین برای فعالیت‌های صنعتی مناسب می‌باشند. در این تحقیق برای ساخت شبکه تقویت‌کننده از روش رشته‌پیچی به کمک قالب سیلیکونی استفاده شده است. ابتدا قالب سیلیکونی با ریختن مایع سیلیکون در قالب پلکسی گلس مطابق شکل 3 ساخته شده است. سپس با قرار دادن قالب سیلیکونی روی قالب چوبی که در شکل 4 نشان داده شده است، عملیات رشته‌پیچی برای ایجاد شبکه تقویت‌کننده‌ها آغاز می‌شود. با قرار دادن الیاف درون شیارهای قالب سیلیکونی و اضافه کردن رزین درون شیار به‌طور همزمان، عملیات ساخت شبکه تقویت‌کننده انجام می‌شود. میخ‌های قالب چوبی نقش هدایت‌کننده الیاف به شیارهای مختلف قالب سیلیکونی را دارد.



Fig. 4 Balsa mold

شکل 4 قالب چوبی

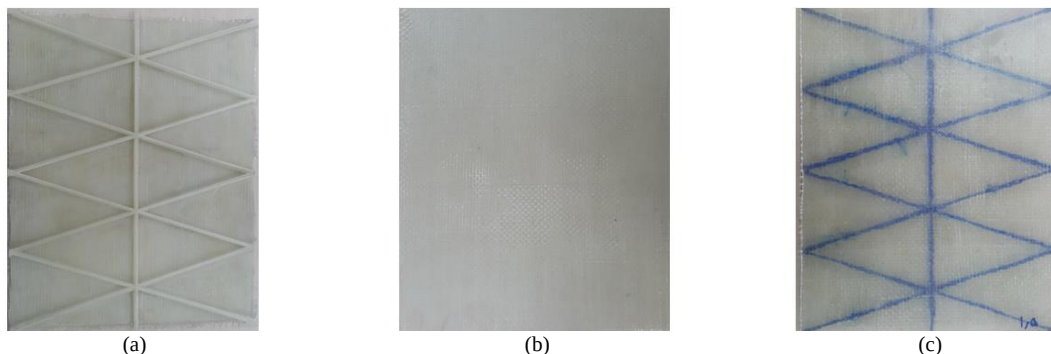


Fig. 5 (a) stiffened plate (b)unstiffened plate (c) sandwich plate

شکل 5 (a) ورق تقویت شده (b) ورق ساده (c) ورق ساندویچی

توسط نرم‌افزار اوريجين⁶ تحلیل شده و مطابق شکل 8 نمودار اِراف⁷ آن استخراج می‌گردد. فرکانسی که در آن مقدار تابع اِراف با جهش مواجه شود، فرکانس طبیعی سازه می‌باشد.

5- شبیه سازی المان محدود

به منظور کاهش هزینه و زمان در تحقیقات بر رفتار ارتعاشی ورق ساندویچی با هسته مشبک، مدل المان محدود، در نرم افزار آباکوس 6-14 ایجاد شده است. که در ادامه مراحل مختلف آن به اختصار توضیح داده خواهد شد.

5-1- مدل سازی

شبکه تقویت‌کننده‌ها در محیط پارت نرم‌افزار سالدورک و ورق‌های چندلایه در محیط پارت نرم‌افزار آباکوس مدل شده است. با ترکیب این بخش‌ها در محیط اسمبلی⁸ ورق ساندویچی با هسته مشبک ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه در مدل واقعی از چسب با مدول الاستیسیته بالا استفاده می‌شود، می‌توان این‌گونه فرض کرد که اجزای مختلف سازه (پوسته‌ها و هسته مشبک) در اتصال کامل نسبت به هم قرار داشته و هیچ‌گونه حرکت نسبی بین سطوح وجود ندارد. بنابراین برای اتصال بین پوسته‌ها و هسته از قید تایی⁹ استفاده شده است.



Fig. 6 Modal test

شکل 6 نمای کلی از آزمایش مودال

پارچه‌های کامپوزیتی ساخته می‌شود. با چسباندن ورق چندلایه به ورق تقویت شده، مطابق شکل 5 ورق ساندویچی با هسته مشبک ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است لازم به ذکر است از الیاف شیشه برای ساخت تقویت‌کننده استفاده شده و پارچه مورد استفاده، الیاف شیشه بافته شده 0 و 90 درجه می‌باشد. همچنین برای ساخت همه بخش‌های نمونه از رزین اپوکسی سی-وای-219¹، با سخت‌کننده اچ‌وای-5161² و با نسبت جرمی 2 به 1، استفاده شده است.

4- آزمون تجربی

پس از ساخت نمونه‌ها، به منظور استخراج فرکانس طبیعی ورق ساندویچی به روش تجربی، آزمایش آنالیز مودال روی نمونه‌ها صورت گرفت. مراحل مختلف آزمایش مودال، شامل آماده سازی سازه برای تست، تحریک سازه، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و پردازش داده‌ها می‌باشد [16]. به منظور آماده‌سازی سازه، 20 نقطه به صورت منظم شامل 4 نقطه عرضی و 5 نقطه طولی بر روی سازه مشخص شده و مطابق شکل 6 سازه به کمک نوارهای نازک با سفتی پایین، معلق نگه داشته می‌شود تا شرایط تکیه گاهی آزاد-آزاد فراهم شود [17]. برای تحریک سازه‌ها در آزمایش مودال، وسایل مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که چکش و لرزشگرهای الکترودینامیکی³ رایج‌ترین آن‌ها می‌باشند. باید به این نکته توجه داشت که در حین تست، جرم، سفتی و میرایی سازه تغییر نکند. در مورد سازه‌های سبک در صورت استفاده از لرزشگر، جرم سازه تغییر کرده و نتایج نامناسبی را به همراه خواهد داشت [18]. بنابراین در بررسی حاضر از چکش به عنوان وسیله تحریک استفاده شده است. ضربه چکش در 20 نقطه مذکور در جهت عرضی به نمونه وارد شده و شتاب‌های ایجاد شده در یک نقطه اندازه‌گیری شده است. همچنین برای جلوگیری از اضافه شدن جرم اضافی به سازه که منجر به تغییر خصوصیات مودال سیستم می‌شود، تنها از یک شتاب‌سنج پی‌سی‌بی⁴ که بالاترین دقت و کمترین وزن را دارد، استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری پاسخ‌ها در آنالیز مودال از ترانسدیوسر⁵ استفاده می‌شود. اطلاعاتی که توسط وسایل اندازه‌گیری پاسخ و تحریک بدست می‌آیند، بوسیله دستگاه آنالایزر، ثبت و مورد پردازش قرار می‌گیرند. نحوه اتصال ترانسدیسورس‌ها به سازه اهمیت بالایی دارد و هرچه سفتی اتصال بیشتر باشد، شرایط مطلوب‌تری فراهم می‌آید. شکل 7 نمودار شتاب و نیروی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. اطلاعات اندازه‌گیری شده

⁶ Origin

⁷ Frequency response function

⁸ Assembly

⁹ Tie

¹ CY-219

² HY-5161

³ Electro-dynamical shaker

⁴ PCB

⁵ Transducer

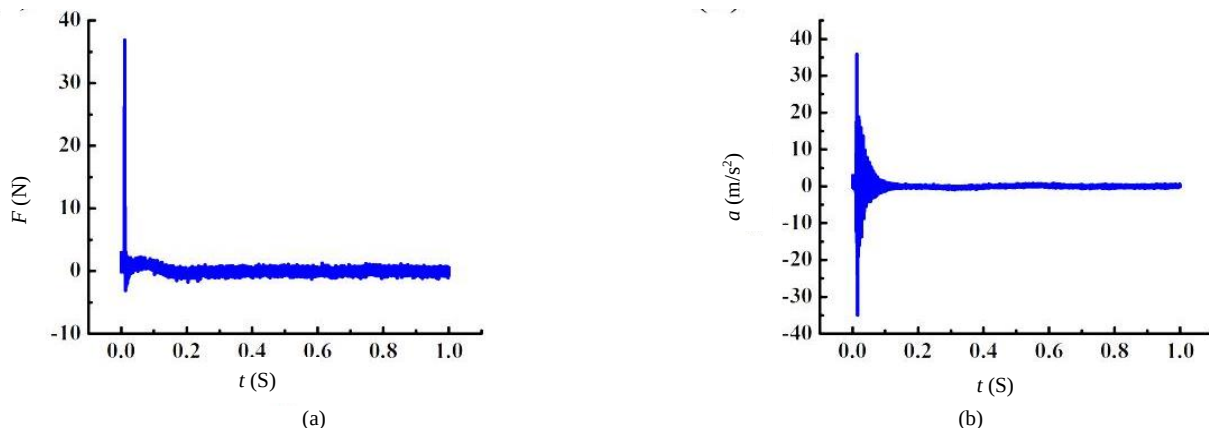


Fig. 7 (a) Force-Time graph (b) Acceleration-Time graph

شکل 7 (a) نمودار نیرو- زمان (b) نمودار شتاب- زمان

ملاحظه‌ای کوچکتر باشد، از المان پوسته استفاده می‌شود. المان‌های پوسته به دو نوع المان پوسته مرسوم و المان پوسته محیط پیوسته تقسیم می‌شوند. تفاوت اصلی این دو المان، تعداد درجات آزادی آن‌ها می‌باشد که با توجه به نوع مسأله و نوع تحلیل، یکی از این دو المان با دقت بالاتری نتایج را بدست می‌دهد. در آنالیز ارتعاشات آزاد ورق‌های ساندویچی می‌توان با دقت بسیار خوبی از المان پوسته مرسوم با مرتبه خطی، اس⁴ آر² استفاده کرد. همچنین برای مش‌بندی تقویت‌کننده‌ها از المان‌های مکعبی کوادراتیک 20 نوده³ استفاده شده است. نوع تحلیل انتخابی نیز تحلیل فرکانسی خطی در آباکوس/ایمپلیسیت⁴ می‌باشد. در شکل 9 برای یک نمونه ورق ساندویچی، تغییرات فرکانس طبیعی با افزایش تعداد المان بررسی شده است و تعداد المان بهینه بدست آمده است. تعداد المان 20296 به عنوان تعداد بهینه المان انتخاب شده است و ابعاد المان مربوط به تقویت‌کننده و چندلایه کامپوزیتی در این مدل، برای مدل‌های دیگر استفاده شده است.

4-5- صحت سنجی شبیه سازی

به منظور بررسی صحت و دقت شبیه سازی، نمونه‌های ساخته شده، در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و فرکانس اصلی ارتعاشات آن‌ها استخراج شده است. این نتایج در جدول 2 با نتایج حاصل از آزمون آنالیز مودال مقایسه شده است. مطابق جدول 2 تفاوت نتایج آزمون تجربی و شبیه سازی عددی بین 5.8%-9.3% می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج تجربی و عددی بوده و صحت شبیه‌سازی را تضمین می‌کند. بنابراین از این مدل شبیه سازی شده به منظور کاهش هزینه و زمان، در طراحی و تحقیقات مختلف

جدول 1 خواص مکانیکی پوسته و تقویت کننده

Table 1 Mechanical properties of shell and stiffener

تقویت کننده	پوسته	مشخصه
1.62	1.468	چگالی (gr/cm)
24	13.7	E_1 مدول الاستیسته
5.5	13.7	E_2 (GPa)
5.5	6	E_3
1.9	1.49	$G_{12} = G_{13}$ مدول برشی
2.5	1.86	G_{23} (GPa)
0.275	0.3	$\theta_{12} = \theta_{13}$ ضریب پواسون
0.0798	0.21	θ_{23}

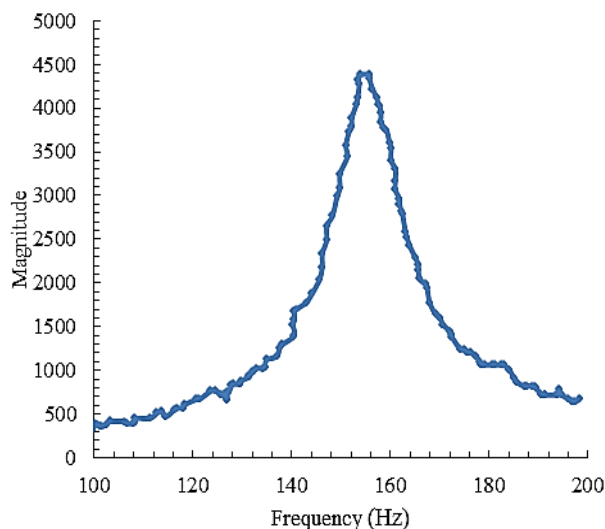
² S4R³ C3D20R⁴ Abaqus/implicit

Fig. 8 Frequency response function graph

شکل 8 نمودار FRF استخراج شده از نرم افزار اوريجین

5-2- خواص مواد

خواص مکانیکی مواد به کمک آزمایش و روابط میکرومکانیک بدست آمده است. با توجه به مشکل بودن برخی از آزمایشات خواص مکانیکی و امکانات آزمایشگاهی موجود، مدول یانگ رزین و الیاف شیشه مورد استفاده برای تقویت‌کننده، از تست کشش بدست آمده است. همچنین مدول یانگ در راستای الیاف چندلایه کامپوزیتی مورد استفاده در ساخت نمونه ساندویچی، به کمک تست کشش بدست آمده است. کسر حجمی چندلایه کامپوزیتی و کسر حجمی تقویت‌کننده نیز با سوزاندن بخشی از نمونه‌ها در کوره بدست آمده است. بقیه خواص مکانیکی به کمک روابط میکرومکانیک و مراجع مختلف بدست آمده است. در جدول 1 خواص مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده آمده است.

5-3- المان بندی

برای مش‌بندی اجزای مختلف سازه از المان‌های آجری شکل استفاده شده است. برای چندلایه کامپوزیتی از المان پوسته مرسوم¹ استفاده شده است. به طور کلی برای اجزای سازه که بعد ضخامت از دو بعد دیگر به طور قابل

¹ Conventional shell

روی رفتار ارتعاشی ورق ساندویچی می‌توان بهره جست.

6- روش تاگوچی

مدل تاگوچی [19] یک روش طراحی آزمایش است که در دهه‌های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [20]. به کمک این روش می‌توان در مطالعات پارامتری با تعداد پارامتر و تعداد سطوح متغیر (منظور از سطح متغیر، یک مقدار مشخص و معین برای آن متغیر می‌باشد) مشخص و البته محدود، تعداد آزمایش‌ها را به صورت قابل توجهی کاهش داد. با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز، سطوح بهینه متغیر بدست می‌آید. همچنین با استفاده از آنالیز واریانس، پارامترهای مؤثر شناسایی و درصد اثرگذاری آن‌ها تعیین می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از روش تاگوچی به بررسی اثر تغییر 3 پارامتر در 3 سطح، بر فرکانس طبیعی سازه پرداخته شده است. برای این منظور از آرایه متعامد L_9 استفاده شده است. در شکل 10 سه نوع شبکه بندی در نظر گرفته شده و همچنین در جدول 3 پارامترهای متغیر و سطوح مربوط به هر پارامتر برای ورق ساندویچی نمایش داده شده است. شرط مرزی به صورت آزاد-آزاد و ضخامت چندلایه‌های کامپوزیتی در یک سازه، یکسان

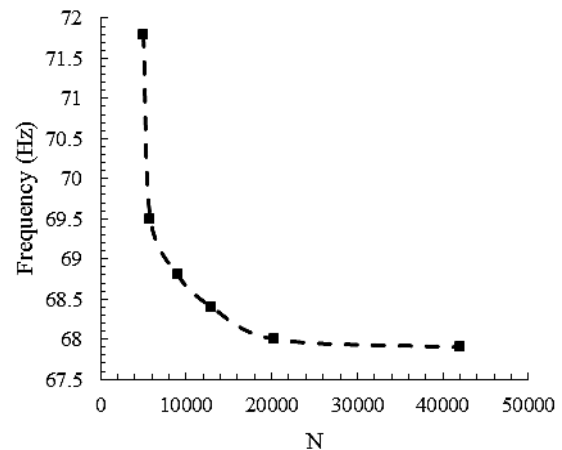


Fig. 9 Mesh convergence study

شکل 9 مطالعه‌ی همگرایی مش

جدول 2 مقایسه نتایج به دست آمده از المان محدود با آزمایش

Table 2 Comparison of the obtained results from FEM with Experiment

شماره نمونه	المان محدود (Hz)	آزمایش (Hz)	خطا %
1	164	150	9.3
2	164	155	5.8
3	158	145	8.9

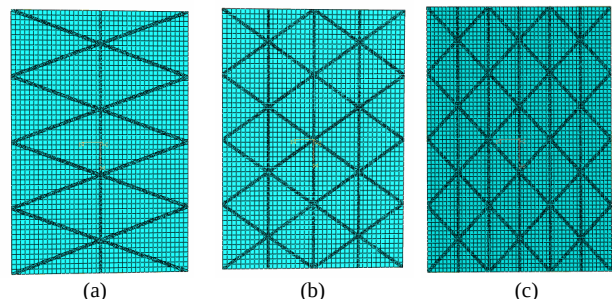


Fig. 10 Types of grids in Taguchi method

شکل 10 انواع شبکه بندی در نظر گرفته شده در مدل تاگوچی

جدول 3 پارامترهای مؤثر و سطوح در نظر گرفته شده ورق ساندویچی

Table 3 Effective parameters and levels of the sandwich plates

پارامترها	1	2	3
شبکه بندی	a	b	c
مقطع ریب (mm^2)	3×3	4×3	5×3
ضخامت پوسته (mm)	0.7	1.4	2

در نظر گرفته شده است.

در روش تاگوچی تغییرات، با عاملی به نام سیگنال به نویز (S/N) معرفی می‌شود و شرایطی که ماکزیمم مقدار سیگنال به نویز را بدهد، شرایط بهینه خواهد بود. معادله سیگنال به نویز به معیار مشخصه کیفیت بستگی دارد. با توجه به اینکه هر چه فرکانس طبیعی بزرگتر باشد، بهتر است و مطلوب ماکزیمم کردن تابع هدف است، از معادله سیگنال به نویز مربوط به معیار مشخصه کیفیت بزرگتر، بهتر، استفاده شده است [21]. این معادله در رابطه (1) آمده است.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1)، n تعداد تکرار آزمایش‌ها است که در بررسی حاضر، 1 در نظر گرفته شده است. Y_i نیز مقادیر خروجی که همان فرکانس‌های طبیعی می‌باشند.

با استفاده از آنالیز واریانس می‌توان میزان اثرگذاری پارامترها را بررسی کرد. به کمک نرم‌افزار مینی‌تب، طبق روابط (2) تا (4) محاسبات مربوط به آنالیز واریانس انجام شده است. با توجه به روابط، مقادیر نسبت واریانس بدست آمده و پارامتر با نسبت واریانس بزرگتر اثرگذاری بیشتری دارد [22].

$$SS_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{N_{Ai}} \quad (2)$$

$$MS_i = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (3)$$

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_{\text{error}}} \quad (4)$$

در روابط (2) تا (4)، A_i مجموع مقادیر سیگنال به نویز برای فاکتور A در سطح i ، N_{Ai} تعداد مقادیر سیگنال به نویز فاکتور A در سطح i ، DF درجه آزادی پارامترها، SS مجموع مربعات تنظیم یافته، MS میانگین مربعات تنظیم یافته و F پارامتر نسبت واریانس می‌باشد.

7- نتایج و بحث

7-1- نتایج مدل تاگوچی

با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز در نرم افزار مینی تب 16، نمودار میانگین مقادیر سیگنال به نویز نسبت به سطوح پارامتر بدست می‌آید. از این نمودار سه مطلب قابل دستیابی می‌باشد:

- سطوحی که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را دارند سطوح بهینه می‌باشد. به طوری که آزمایشی که در آن تمام پارامترها، سطح بهینه خود را داشته باشند، مطلوب‌ترین خروجی را نسبت به هر ترکیب پارامتر دیگری می‌دهد.
- نحوه اثرگذاری پارامترها را می‌توان با توجه به مثبت و منفی بودن شیب خطوط نمودار تعیین کرد. به طوری که اگر شیب خطوط در سرتاسر نمودار مثبت باشد، یعنی با افزایش مقدار پارامتر، خروجی به مقدار بهینه خود نزدیک می‌شود. اگر شیب خطوط در سرتاسر نمودار منفی باشد، یعنی با افزایش مقدار پارامتر، خروجی از مقدار بهینه خود

صورت تجربی و عددی پرداخته شد. ابتدا به کمک قالب سیلیکونی و روش رشته‌پیچی شبکه تقویت‌کننده‌ها ساخته شد و با قرار دادن چند لایه پارچه به صورت دستی ورق تقویت شده با شبکه مثلثی ایجاد شد. سپس با روش لایه‌چینی دستی ورق چندلایه ساخته شده و با چسباندن ورق چندلایه به

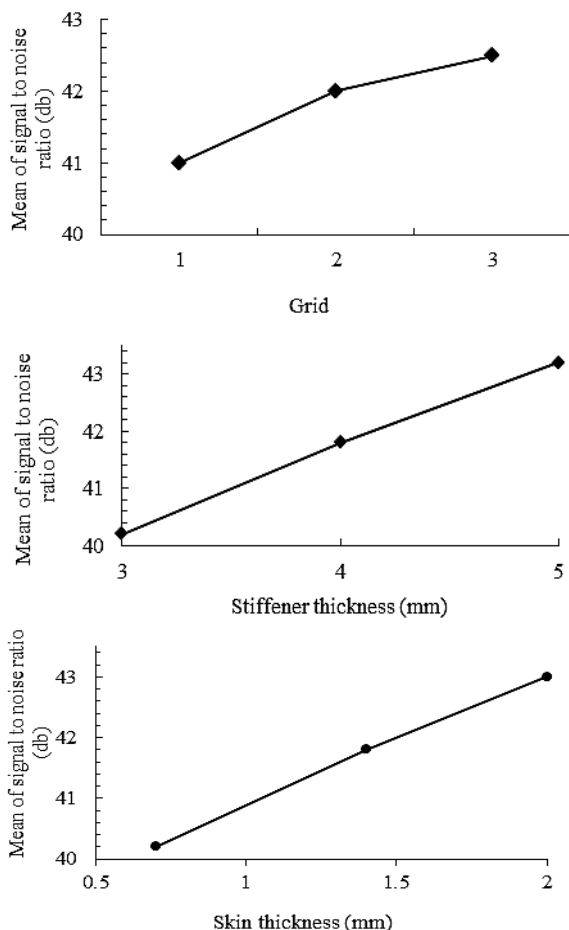


Fig. 11 S/N analysis of the composite sandwich plate with isogrid cores
 شکل 11 مقادیر میانگین سیگنال به نویز ورق ساندویچی کامپوزیتی با شبکه مثلثی

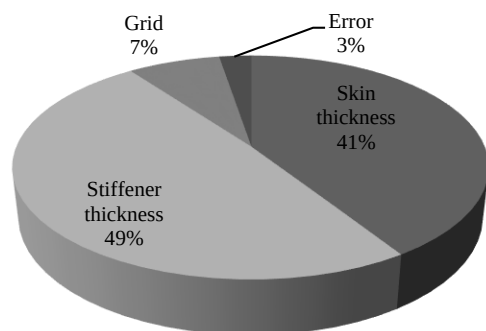


Fig. 12 Distribution of parameters of the composite sandwich plate with isogrid cores

شکل 12 توزیع اثرگذاری پارمترهای ورق ساندویچی کامپوزیتی با شبکه مثلثی شکل

جدول 4 مشخصات هندسی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی شکل

Table 4 Geometrical parameters of sandwich plate with isogrid core		
شبکه بندی	مقطع ریب (mm ²)	ضخامت پوسته (mm)
b	3×4	1.4

دور می‌شود. اگر در بخشی از نمودار علامت شیب خطوط عوض شود، از نمودار فقط سطح بهینه استخراج شده و نمی‌توان یک برداشت کلی از نمودار کرد. چرا که در روش تاگوچی مزیت نسبی پارامترها نسبت به هم سنجیده می‌شود و اثر پارامترها به صورت مجزا مطرح نیست. بنابراین برای اظهار نظر قطعی نسبت به نحوه اثرگذاری پارامترهایی که نمودار آن‌ها با تغییر علامت شیب همراه است، نیاز به بررسی اثر تغییرات خروجی نسبت به تغییر پارامتر مورد نظر به صورت مجزا می‌باشد.

بر اساس تندی شیب خطوط می‌توان شدت تأثیر هر پارامتر بر خروجی در مقایسه با دیگر پارامترها را بررسی کرد [23]. یعنی هر چه شیب خطوط نمودار برای یک پارامتر تندتر باشد، نشان‌دهنده تأثیر بیشتر این پارامتر بر خروجی می‌باشد که این مطلب در آنالیز واریانس به طور دقیق‌تر بررسی می‌شود.

با استفاده از آنالیز واریانس، ترتیب و درصد اثرگذاری پارامترها بدست می‌آید و در طراحی باید به پارامترهای با درصد اثرگذاری بالا توجه بیشتری شود.

نتایج بدست آمده از آنالیز سیگنال به نویز برای ورق ساندویچی با شبکه مثلثی در شکل 11 آمده است. مطابق شکل 11 با افزایش ضخامت پوسته، ضخامت و تعداد تقویت‌کننده، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده آن است که افزایش هر کدام از این پارامترها، سفتی سازه را بیشتر از وزن افزایش می‌دهد. بهترین ترکیب سطوحی که بیشترین فرکانس طبیعی را ایجاد می‌کند، ضخامت پوسته 2 میلی‌متر، ضخامت تقویت‌کننده 5 میلی‌متر و شبکه بندی c می‌باشد. شکل 12 نمودار درصد اثرگذاری پارامترها را نشان می‌دهد که از آنالیز واریانس بدست آمده است. با توجه به شکل 12 ترتیب اثرگذاری پارامترها بصورت ضخامت تقویت‌کننده با 49%، ضخامت پوسته با 41% و تعداد تقویت‌کننده با 7% می‌باشد. بنابراین ضخامت تقویت‌کننده بیشترین اثر و تعداد تقویت‌کننده کمترین اثر را روی فرکانس طبیعی دارند. حساسیت فرکانس طبیعی نسبت به ضخامت تقویت‌کننده و ضخامت پوسته تقریباً یکسان است و با تغییر هر کدام، فرکانس طبیعی تقریباً به یک نسبت تغییر می‌کند. همچنین تغییر هر کدام از پارامترهای ضخامت تقویت‌کننده و ضخامت پوسته در مقایسه با تغییر تعداد تقویت‌کننده اثر بیشتری روی تغییرات فرکانس طبیعی دارد.

7-2- بررسی کارآمدی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی

به منظور تحقیق کارآمدی سازه ساندویچی با شبکه مثلثی نسبت به ورق چندلایه، فرکانس اصلی ورق ساندویچی با مشخصات هندسی مطابق جدول 4، در شرایط مرزی مختلف با پوسته ساده هم وزن مقایسه شده است. مطابق جدول 5 فرکانس اصلی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی در حالت شرط مرزی آزاد 133% و در حالت شرط مرزی گیردار 138% نسبت به ورق چندلایه هم وزن بیشتر است. این افزایش فرکانس نشان دهنده آن است که می‌توان با تغییر پیکربندی سازه بدون تغییر وزن، سفتی سازه و به تبع آن فرکانس طبیعی سازه را افزایش داد. بنابراین ورق ساندویچی با شبکه مثلثی نسبت به ورق چندلایه، فرکانس اصلی بسیار بهتری دارد و می‌توان در کاربردهای مختلف، سازه‌ها را به صورت سبک‌تر ساخت و فرکانس مورد نیاز را تأمین کرد.

8- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی ارتعاشات آزاد ورق ساندویچی با شبکه مثلثی به

جدول 5 مقایسه فرکانس طبیعی ورق ساندویچی با ورق چندلایه معادل

Table 5 Comparison of the natural frequency of sandwich plate with multi ply plate

شرایط مرزی	فرکانس اصلی ورق ساندویچی	فرکانس اصلی ورق چندلایه	درصد افزایش فرکانس اصلی
آزاد	127.63	54.61	133%
گیردار	263.49	110.55	138%

ورق تقویت‌شده، ورق ساندویچی با شبکه مثلثی ایجاد گردید. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش مودال با تحریک چکش قرار گرفتند و فرکانس اصلی ارتعاشات آن‌ها استخراج شد. به منظور کاهش هزینه و زمان در طراحی و تحقیقات مختلف روی رفتار ارتعاشی ورق ساندویچی، شبیه‌سازی ارتعاشات آزاد این سازه در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت و با نتایج بدست آمده از آزمایش مودال مقایسه شد. بیشترین خطا بین نتایج تجربی و عددی 9.3% می‌باشد، که نشان دهنده صحت و دقت مدل شبیه سازی شده می‌باشد. به منظور مطالعه پارامتری و بهینه‌سازی مقدماتی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی در طراحی بر مبنای سفتی، از روش تاگوچی استفاده شد. 3 پارامتر در 3 سطح مختلف در نظر گرفته شد و با استفاده از آرایه L_9 ، تعداد 9 شبیه سازی با ترکیب پارامترهای مختلف هندسی صورت گرفت. با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز سطوح بهینه پارامترها شامل، ضخامت پوسته 2 میلی‌متر، ضخامت تقویت‌کننده 5 میلی‌متر و شبکه‌بندی C بدست آمد. همچنین نشان داده شد که با افزایش ضخامت پوسته، ضخامت و تعداد تقویت‌کننده، فرکانس طبیعی ورق ساندویچی با شبکه مثلثی افزایش می‌یابد. با استفاده از آنالیز واریانس ترتیب اثرگذاری پارامترها بصورت ضخامت تقویت‌کننده با 49%، ضخامت پوسته با 41% و تعداد تقویت‌کننده با 7% بدست آمد. بنابراین ضخامت تقویت‌کننده بیشترین اثر و تعداد تقویت‌کننده کمترین اثر را روی فرکانس طبیعی دارند. حساسیت فرکانس طبیعی نسبت به ضخامت ریب و ضخامت پوسته تقریباً یکسان است و با تغییر هر کدام، فرکانس طبیعی تقریباً به یک نسبت تغییر می‌کند. همچنین تغییر هر کدام از پارامترهای ضخامت تقویت‌کننده و ضخامت پوسته در مقایسه با تغییر تعداد تقویت‌کننده اثر بیشتری روی تغییرات فرکانس طبیعی دارد.

9- مراجع

- H. Khosravi, R. Eslami-Farsani, An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016. (in Persian)
- T. Hosomura, T. Kawashima, D. Mori, New CFRP structural elements (for spacecraft), *Composite Materials: Mechanics, Mechanical Properties and Fabrication*, Vol. 1, No. 1, pp. 447-452, 1981.
- T. D. Kim, Fabrication and testing of composite isogrid stiffened cylinder, *Composite Structures*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-6, 1999.
- S. M. Huybrechts, T. E. Meink, P. M. Wegner, J. M. Ganley, Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, No. 2, pp. 155-161, 2002.
- H. Zhao, Improvement of vibration damping capacity and fracture toughness in composite laminates by the use of polymeric interleaves, *The American Society of Mechanical Engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 309-314, 2001.
- P. Jadhav, P. R. Mantena, R. F. Gibson, Energy absorption and damage evaluation of grid stiffened composite panels under transverse loading, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 191-199, 2006.
- P. Jadhav, P. R. Mantena, Parametric optimization of grid-stiffened composite panels for maximizing their performance under transverse loading, *Composite Structures*, Vol. 77, No. 3, pp. 353-363, 2007.
- M. Hemmatnezhad, G. Rahimi, M. Tajik, F. Pellicano, Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells, *Composite Structures*, Vol. 120, No. 1, pp. 509-518, 2015.
- G. H. Rahimi, Mehdi Zarei, Free vibration analysis of grid stiffened composite conical shells, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-8, 2017. (in Persian)
- L. Chen, H. Fan, F. Sun, L. Zhao, D. Fang, Improved manufacturing method and mechanical performances of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder, *Thin-Walled Structures*, Vol. 68, pp. 75-84, 2013.
- H. Zhang, F. Sun, H. Fan, H. Chen, L. Chen, D. Fang, Free vibration behaviors of carbon fiber reinforced lattice-core sandwich cylinder, *Composites Science and Technology*, Vol. 100, No. 1, pp. 26-33, 2014.
- Z. Zhang, H. Chen, L. Ye, A stiffened plate element model for advanced grid stiffened composite plates/shells, *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 2, pp. 187-202, 2011.
- Z. Zhang, H. Chen, L. Ye, Progressive failure analysis for advanced grid stiffened composite plates/shells, *Composite Structures*, Vol. 86, No. 1, pp. 45-54, 2008.
- V. Tahani, D. Shahgholian Ghahfarokhi, Gh. H. Rahimi, Experimental and numerical investigation of effect of shape of ribs on flexural behavior of grid composite plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 303-311, 2016. (in Persian)
- D. Shahgholian Ghahfarokhi, V. Tahani, G. H. Rahimi, 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*, Vol. 3, No. 4, pp. 333-342, 2017. (in Persian)
- D. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice, and Application*, Second Edition, pp. 305-320, New York: Research Studies Press, 2000.
- J. He, Z. Fu, Modal analysis theory of an SDOF dynamic system, *Modal Analysis*, Second Edition, pp. 79-93, New York: Research Studies Press, 2001.
- M. A. Peres, R. W. Bono, Modal testing and shaker excitation: setup considerations and guidelines, 0148-7191, *SAE Technical Paper*, pp. 2011.
- P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*, Second Edition, pp. 50-55, New York: McGraw Hill Professional, 1988.
- J. E. Choi, G. D. Ko, K. J. Kang, Taguchi method-based sensitivity study of design parameters representing specific strength of wire-woven bulk Kagome under compression, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 10, pp. 2547-2553, 2010.
- N. R. Kolanu, S. S. Prakash, M. Ramji, Experimental study on compressive behavior of GFRP stiffened panels using digital image correlation, *Ocean Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 290-302, 2016.
- D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*: Second Edition, pp. 50-55, New York: John Wiley & Sons, 2008.
- A. R. Nikravan, F. Kolahan, Statistical analysis and optimization of process parameters for cutting rate and surface roughness in wire cut machining of Ti-6AL-4V alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 141-152, 2016. (in Persian)