



## تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته ساندویچی مخروطی با هسته مشبک کامپوزیتی بر مبنای روش‌های تجربی و عددی

ملیحه رهنما<sup>1</sup>، رضا حمزه‌لو<sup>2\*</sup>، محمدمراد شیخی<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16846-13114، rehamzeloo@sru.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این مطالعه، تحلیل مودال پوسته‌های ساندویچی مخروطی سه‌جزئی با یک هسته مشبک کامپوزیتی بر مبنای روش‌های تجربی و تئوری ارائه شده است. بدین منظور، دو نمونه از چنین ساندویچی متشکل از دو رویه همسان از پارچه کولار و هسته مشبک میانی با سلول‌های شش‌ضلعی منظم و الیاف ترکیبی از شیشه - کربن ساخته شد. در ادامه، آزمون‌های مودال برای استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها بر مبنای جمع‌آوری داده‌ها از 40 نقطه بر روی سطح پوسته (پنج مقطع عرضی در راستای یال مخروط و هشت نقطه محیطی با زاویه 45° توسط دستگاه سرعت‌سنج لیزری انجام شده است. بر طبق نتایج تجربی، اختلاف فرکانس‌های طبیعی دو نمونه پوسته ساندویچی برای اولین شکل مود کمتر از 3٪ و برای دومین شکل مود تقریباً 6٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، کمترین خطا ممکن در طراحی مفهومی مراحل مختلف ساخت و در حین اجرای فرآیندها برای تولید پوسته ساندویچی مخروطی مشبک وجود داشته است. همچنین در ادامه به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از آزمون مودال، شبیه‌سازی عددی با استفاده از المان‌های سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس صورت پذیرفته است. مقایسه فرکانس‌های طبیعی مطابق با شکل مودهای مختلف بر مبنای روش‌های المان محدود آباکوس و تجربی نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد که حداکثر اختلاف در فرکانس طبیعی کمتر از 16٪ می‌باشد.

دریافت: 1402/11/07

پذیرش: 1402/12/17

### کلیدواژگان

پوسته ساندویچی مخروطی، هسته مشبک کامپوزیتی، آزمون مودال، شبیه‌سازی المان محدود

## Experiments and numerical simulations for free vibration analysis of sandwich conical shells with anisogrid composite lattice core

Malihe Rahnema<sup>1</sup>, Reza Hamzeloo<sup>2\*</sup>, Mohammad Morad Sheikhi<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran  
P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, rehamzeloo@sru.ac.ir

### Keywords

Sandwich conical shell,  
Composite lattice core,  
Modal test,  
Finite element method.

### Abstract

In this study, the modal analysis of sandwich conical shells with a composite lattice core was presented using experimental and numerical methods. For this purpose, samples of such sandwich were made of two identical Kevlar-fabric face sheets and a composite (glass-carbon fibers) lattice core with regular hexagonal cells. Next, modal tests were carried out to extract the natural frequencies and the mode shapes by collecting frequency responses using a laser accelerometer. Also, ABAQUS FE simulations were presented in order to validate the results obtained from modal tests using three-dimensional elements. According to the experimental results, the difference in the natural frequencies of samples is less than 3% for the first mode shape  $(m, n)=(1,2)$  and 6% for the second mode shape  $(m, n)=(1,3)$ . Therefore, it can be concluded that there is the least possible error in the conceptual design and the implementation of various manufacturing processes. In addition, there is good agreement between the results obtained from modal tests and ABAQUS finite element method, i.e. the maximum difference in natural frequencies of the first four mode shape is approximately 16%.

### 1- مقدمه

درونی برای تحمل بارهای جانبی وارده به سازه و یک هسته سبک جهت افزایش استحکام کمانشی و مقاومت به بار ضربه می‌باشند. ساختارهای مشبک با شبکه‌بندی‌های منظم که از الیاف‌های (ریبها) فلزی یا کامپوزیتی ساخته می‌شوند به عنوان یکی از پرکاربردترین هسته‌های تقویتی در ساندویچ‌ها می‌باشند [1]. به صورت کلی، هسته مشبک یک سازه مرکب شبکه‌ای با آرایش

در بسیاری از کاربردها در صنعت هوافضا و عمران، از سازه‌های ساندویچی به دلیل استحکام بالا و قابلیت تحمل بار قابل توجه استفاده می‌شود [1-3]. به صورت متداول، ساندویچ‌ها متشکل از سه بخش مجزا شامل دو رویه بیرونی-

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Rahnema, M., Hamzeloo, R., Sheikhi, M. M., "Experiments and numerical simulations for free vibration analysis of sandwich conical shells with anisogrid composite lattice core." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2357-2362, 2024.  
https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2020606.1873

استخراج فرکانس‌های طبیعی چنین پوسته‌هایی با استفاده از روش‌های تئوری اختصاص یافته است. در مطالعه حاضر برای اولین بار، آنالیز مودال تجربی و عددی ساندویچ مخروطی سه‌جزئی شامل دو رویه مشابه بیرونی و درونی از جنس پارچه کولار و یک هسته مشبک با ریب‌های کامپوزیتی (ترکیبی از الیاف‌های شیشه-کربن) ارائه می‌شود. بدین منظور، دو نمونه از چنین ساندویچی طی چهار مرحله شامل: 1- طراحی قالب فومی مخروطی شکل توسط دستگاه CNC، 2- ساخت رویه درونی با پیچاندن پارچه کولار روی سطح یال و پخت در دمای محیط، 3- ترسیم و چاپ گسترش مدل سه‌بعدی از یک ساختار مشبک با سلول‌های شش‌ضلعی و الیاف‌پیچی دستی ریب‌های کامپوزیتی و 4- ساخت رویه بیرونی روی سطح هسته مشبک مشابه مرحله دوم و تکمیل فرآیندها با قرار دادن در دستگاه اتوکلاو به مدت 12 ساعت در دمای 180 درجه سانتی‌گراد ساخته می‌شود. سپس مشخصه‌های مودال شامل: فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای پوسته‌های مشبک ساندویچی با جمع‌آوری داده‌ها توسط دستگاه سرعت‌سنج لیزری برای چهل نقطه روی سطح آن که تحت تحریک‌کننده هارمونیک می‌باشند، استخراج می‌گردند. در گام پایانی به منظور صحت‌سنجی فرآیندهای ساخت و آزمون مودال، نتایج حاصل از روش تجربی با شبیه‌سازی عددی بر مبنای مدل‌های المان محدود آباکوس مقایسه می‌شوند.

## 2- روش تجربی (ساخت و آزمون مودال)

مطابق با مدل شماتیک سه‌بعدی در شکل 1a، پوسته مخروطی ناقص ساندویچی سه‌جزئی (شامل دو رویه کولار همسان و یک هسته مشبک با ریب‌های کامپوزیتی و سلول‌های شش‌ضلعی) با طول یال مخروط، شعاع سطح میانی در دو انتها و ضخامت‌های رویه‌ها و هسته مشبک را در نظر بگیرید. در این بخش، تمامی مراحل ساخت و آزمون مودال برای مطالعه رفتار ارتعاشاتی دو نمونه از پوسته‌ی با چنین مشخصاتی که در شکل 1b نشان داده شده است، با جزئیات شرح داده می‌شود.

به صورت کلی فرآیندهای ساخت چنین پوسته ساندویچی را می‌توان طی چهار مرحله شامل: 1- تولید قالب فومی، 2- رویه درونی، 3- هسته مشبک کامپوزیتی و 4- رویه بیرونی تقسیم‌بندی نمود، که در ادامه هر یک از آن‌ها به صورت مختصر توضیح داده می‌شود. در گام اول، ابتدا یک مدل سه‌بعدی از قالب مخروطی شکل با استفاده از نرم‌افزار کتیا فراهم می‌شود و با خروجی کورل دراو به دستگاه ماشین‌کاری CNC منتقل می‌گردد. سرانجام با کنار هم قرار دادن بلوک‌های مختلف از جنس فوم فشرده پلی‌استایرن یک قالب مخروطی مطابق شکل 2 برای تولید رویه داخلی آماده می‌شود. در گام دوم، ابتدا بر روی قالب به صورت کامل واکس زده خواهد شد و سپس در دو مرتبه پارچه کولار با استفاده از رزین اپوکسی 50 روی سطح قالب فومی مخروطی شکل پیچانده می‌شود. با انجام پخت در به مدت یک روز در دمای محیط رویه داخلی مطابق شکل 3a ساخته می‌شود.

در مرحله سوم، ابتدا ترسیم و چاپ گسترش مدل سه‌بعدی برای یک هسته مشبک با سلول‌های شش‌ضلعی با استفاده از نرم‌افزار کتیا انجام می‌پذیرد و با استفاده از چسب دوطرفه بر روی فوم و روی رویه درونی چسبانده می‌شود. سپس با درآوردن مکان‌های دقیق برای ریب‌ها، فرآیند الیاف‌پیچی دستی با استفاده از ترکیبی با نسبت 3 به 1 از فایبرهای شیشه و کربن صورت می‌پذیرد. سرانجام با اجرای فرآیند وکیوم و پخت در دمای محیط به مدت 24 ساعت، هسته مشبک کامپوزیتی مطابق شکل 3b تولید می‌شود. در گام پایانی، ابتدا با استفاده از پارچه داکرون و واکس سطح رویی سازه دوجزئی شامل هسته مشبک

منظم از المان‌های تیر که به یکدیگر متصل شده‌اند که یک محیط پیوسته صفحه‌ای (دوبعدی) یا فضایی (سه‌بعدی) را تشکیل می‌دهند. به منظور کاهش وزن و افزایش هم‌زمان استحکام در راستای دلخواه، معمولاً از دو دسته ریب زاویه‌دار (مقاطع) با سطح مقطع و جنس ماده همسان استفاده می‌گردد. از سوی دیگر از آنجایی که در بسیاری از کاربردهای مهندسی سازه تحت‌گردایان دمای بالا قرار می‌گیرد، استفاده از پارچه‌ها و فایبرها کامپوزیتی به ترتیب در تولید رویه‌ها و هسته‌های مشبک به سرعت در حال افزایش می‌باشد [1-3]. یک لایه مشبک با ریب‌های کامپوزیتی در مقایسه با رویه‌های همگن و کامپوزیتی پیوسته کلاسیک دارای نسبت کمتری از وزن به استحکام و قابلیت تحمل بار بیشتری می‌باشد، که علاوه بر کاهش مواد مصرفی (به تبع آن هزینه‌ها)، آن‌ها را مناسب برای استفاده در اکثر کاربردهای عملی در محیط‌های حرارتی و تحت نیروهای اینرسی می‌نمایند. علاوه بر این ویژگی‌ها، باید این نکته را ذکر کرد که ساختارهای مشبک دارای قابلیت بالای جذب انرژی و مقاوم در برابر عوامل خوردگی می‌باشند.

در دهه‌های اخیر، بررسی رفتار مکانیکی پوسته‌های ساندویچی با یک هسته مشبک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته شده است. در این زمینه، شاتاو و همکاران [4] با استفاده از روش المان محدود و تئوری کلاسیک پوسته مقادیر کمانش و شکل مودهای پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های غیر همسانگرد مشبک که تحت فشار هیدرواستاتیک می‌باشند، ارائه دادند. زارعی و همکاران [5]، رفتار کمانشی پوسته‌های مخروطی ساندویچی چندلایه با هسته تقویت‌شده مشبک را بر مبنای تئوری مرتبه اول برشی و روش سفتی معادل مطالعه کردند. یانگ و همکاران [6] با بکار بردن روش‌های تجربی و المان محدود، آسیب‌پذیری مبتنی بر رفتار ارتعاشاتی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های مشبک کربنی موج‌دار را بررسی نمودند. شاهقلیان و همکاران [7]، به بررسی رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های مشبک بر مبنای روش تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداخته‌اند. فلاح و همکاران حل‌های تحلیلی برای رفتار کمانشی [8] و پس‌کمانشی [9] پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی غیرهمسانگرد که تحت بارگذاری ترکیبی ترمومکانیکی می‌باشند، با استفاده از تئوری مرتبه اول برشی دائل ارائه دادند. جای و همکاران [10]، رفتار کمانش حرارتی ورق‌های ساندویچی با هسته‌ی مشبک خرابی‌ی چهارضلعی و تحت جریان مافوق صوت را مطالعه نمودند. نظری و همکاران [11]، بر اساس روش‌های تجربی و عددی رفتار ارتعاشاتی پوسته‌های کامپوزیتی فلز و الیاف تقویت‌شده با هسته مشبک مورد مطالعه قرار دادند. شاهقلیان و همکاران [12]، کمانش پوسته‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته ایزوگرید تحت فشار خارجی یکنواخت را به صورت تحلیلی بررسی نمودند. کارتونن و همکاران [13]، مدل‌های المان محدودی بر اساس تئوری‌های تیموشنکو و اوایلر-برنولی برای تیرهای ساندویچی با هسته مشبک پیشنهاد دادند. لی و همکاران [14]، شبیه‌سازی‌های عددی برای بدست آوردن پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای ساندویچی با هسته مشبک لانه‌زنبوری تحت ضربه با سرعت پایین را اجرا نمودند. زارعی و رحیمی [15]، رفتار کمانش پوسته‌های چند بخشی متصل استوانه‌ای - مخروطی ساندویچی با هسته مشبک که تحت فشار خارجی می‌باشند را با استفاده از تئوری مرتبه اول برشی لاو و روش المان محدود مطالعه نمودند.

مروری بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی مخروطی سه‌جزئی با هسته مشبک کامپوزیتی به صورت تجربی بررسی نشده است. همچنین فقط مطالعات بسیار محدودی برای

شکل 3 (الف) رویه داخلی از جنس کولار و (ب) فرآیند وکیوم سازی پوسته فرآیند ساخت رویه داخلی کولار و هسته مشبک کامپوزیتی

در ادامه روش تجربی فرآیند انجام آزمون‌های مودال برای استخراج پارامترهای ارتعاشاتی دو نمونه ساخته شده شامل: فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها، به صورت مختصر شرح داده شده است. بدین منظور، سطح پوسته مشبک مخروطی ناقص را بر مبنای پنج مقطع عرضی در راستای یال مخروط و با هشت نقطه محیطی با زاویه  $45^\circ$  تقسیم‌بندی و مطابق شکل 4 معلق می‌گردد. سپس تحریک‌کننده هارمونیک به نقطه شماره 41 چسبانده می‌شود و با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج لیزری پاسخ فرکانسی هر نقطه را ظرف مدت یک دقیقه (مدت داده‌برداری) جمع‌آوری شده و پردازش آن‌ها انجام می‌پذیرد.



Fig. 4 The experimental setup and equipment for modal test of anisogrid composite lattice conical shell

شکل 4 معلق‌سازی و شبکه‌بندی پوسته مخروطی، تحریک‌کننده هارمونیک و سرعت‌سنج لیزری برای انجام آزمون‌های مودال

### 3- شبیه‌سازی المان محدود

در این بخش به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی نتایج تجربی، مدل‌های المان محدودی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای رویه‌های کولار و هسته مشبک کامپوزیتی با سلول‌های شش‌ضلعی منتظم مطابق شکل 5 فراهم می‌گردد. اجزای مختلف پوسته مخروطی ناقص ساندویچی شامل: رویه‌های درونی-بیرونی و هسته مشبک کامپوزیتی با استفاده از المان‌های سه‌بعدی C3D8R مدل‌سازی شده‌اند.

و رویه درونی پوشانده می‌شود. سپس مشابه فرآیندهای انجام شده در مرحله دوم پارچه کولار روی سطح پیچانده می‌شود و به مدت یک روز در دمای محیط نگه داشته می‌شود. در نهایت به منظور تکمیل فرآیند ساخت پوسته ساندویچی سه‌جزئی، جداسازی قالب و استحکام بخشی، سازه به مدت 12 ساعت در دستگاه اتوکلاو در دمای 180 درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد.

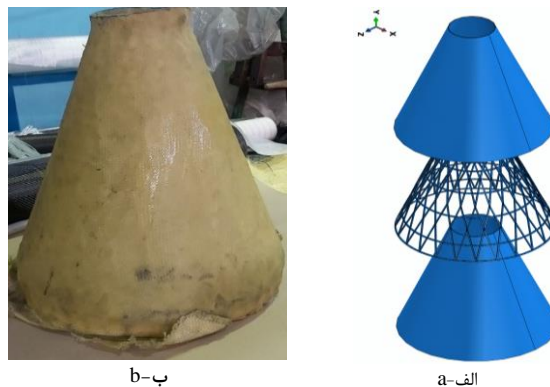


Fig. 1 (a) The schematic model and (b) specimen of three-skin truncated conical shells made of Kevlar skins and anisogrid composite lattice core

شکل 1 (الف) مدل شماتیک سه‌بعدی و (ب) یک نمونه ساخته شده پوسته مخروطی ناقص ساندویچی سه‌جزئی شامل دو رویه کولار همسان و یک هسته مشبک کامپوزیتی

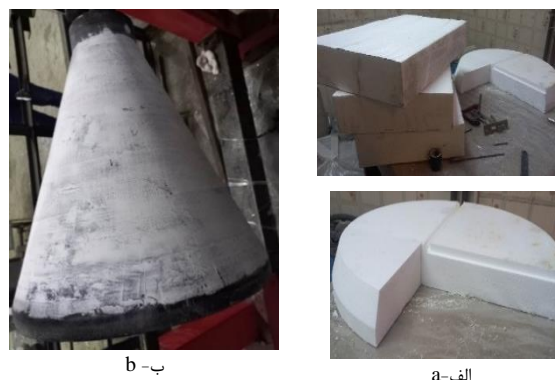


Fig. 2 (a) Several cutting block and (b) fabrication of truncated conical foam mold

شکل 2 (الف) بلوک‌های مختلف و (ب) ساخت قالب مخروطی شکل از جنس فوم پلی‌استایرن



Fig. 3 (a) The Kevlar inner skin and (b) vacuum process of anisogrid composite lattice core

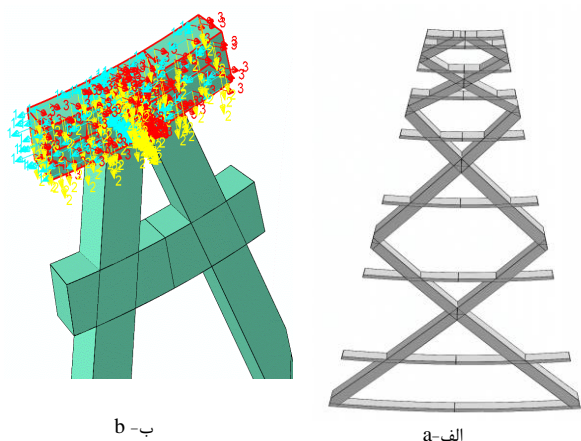


Fig. 6 (a) The sector of lattice core and (b) material orientation in ABAQUS FE software

شکل 6 جزئیات مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس: (الف) قطعی از مدل سه‌بعدی هسته مشبک و (ب) جهت‌دهی خواص مکانیکی

#### 4- نتایج عددی و بحث

در بخش حاضر، به بررسی و بحث بر روی پارامترهای مودال نظیر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها حاصل از روش‌های تجربی پرداخته می‌شود و همچنین مطالعات صحت‌سنجی در مقایسه با نتایج المان محدود ارائه می‌شود. در مطالعه اول به منظور تأیید دقت طراحی و صحت‌سنجی اجرای فرآیندهای ساخت، پاسخ‌های فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها برای دو نمونه ساخته شده از پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی با هسته مشبک با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در شکل 7، پاسخ فرکانسی مربوط به نقطه شماره یک از دو نمونه تحت تحریک هارمونیک ارائه شده‌اند.

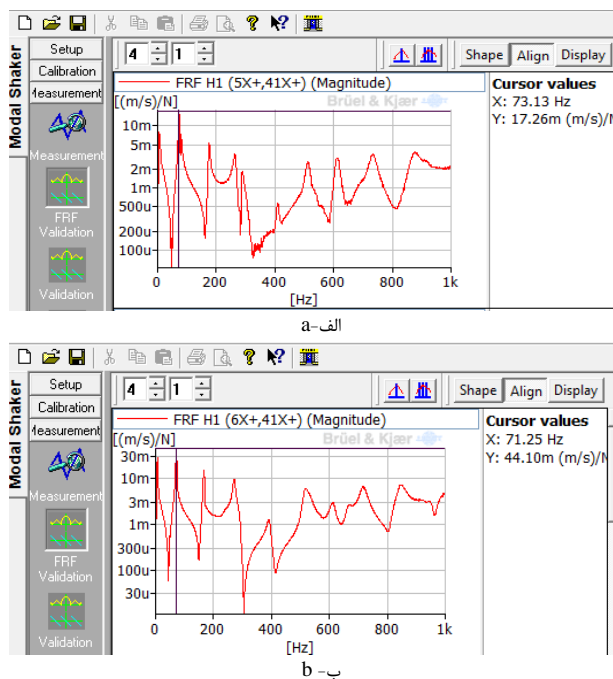


Fig. 7 Comparison between the frequency response function (FRF) for two samples of the anisogrid composite lattice sandwich conical shell  
شکل 7 پاسخ فرکانسی مربوط به دو نمونه ساخته شده از پوسته‌ی ساندویچی مشبک تحت تحریک هارمونیک

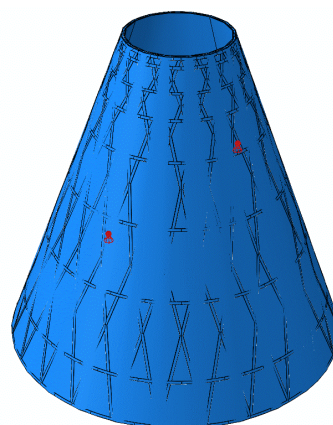


Fig. 5 The finite element models of sandwich truncated conical shell

شکل 5 مدل المان محدودی از پوسته مخروطی ساندویچی

در ادامه به صورت مختصر جزئیات مدل‌سازی سه لایه پوسته ساندویچی بر روی یکدیگر شرح داده می‌شود: در ابتدا مدل‌های رویه‌های بیرونی و داخلی بصورت مخروط ناقص با استفاده از المان‌های سه‌بعدی تغییر شکل‌پذیر ایجاد شد. سپس هسته مشبک داخلی که براساس هندسه مول سلولی در شکل 6a بصورت چیدمان تکرار محوری و با مقیاس افزایشی در طول یال مخروط ایجاد شده و کنار هم قرار گرفته بودند بصورت یک مدل مخروط ناقص متقارن مدور ایجاد گردید [16]. در گام بعدی، خواص مکانیکی شامل مدول‌های الاستیسیته، مدول برشی، ضریب پواسون و چگالی مطابق با جدول 1، به مدل‌های سه‌بعدی رویه‌ها و هسته مشبک اختصاص می‌یابد.

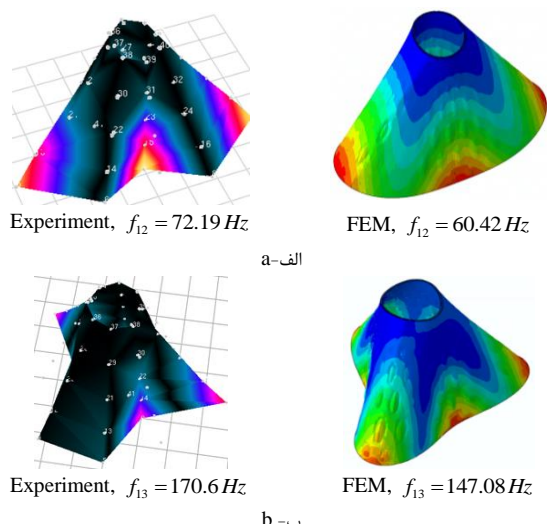
جدول 1- خواص مکانیکی اجزای پوسته ساندویچی مخروطی شکل

Table 1 Material properties for various components of sandwich conical shells

اجزای ساندویچ	خواص مکانیکی					$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (GPa)	
رویه کامپوزیتی	30	30	7	0.2	5	0.34
ریبها	70	7.5	7.5	0.3	4.5	0.34

باید به این نکته اشاره گردد که با توجه به ماهیت جهت‌دار بودن ماده مورد استفاده (کامپوزیت) برای تولید ریب‌های مشبک، لازم می‌باشد که جهت مناسب برای خواص مکانیکی مورد نظر در روی ریب‌های مطابق شکل 6b انتخاب شود. لازم به اشاره می‌باشد که یکی از موارد مهم برای پیش‌بینی دقیق رفتار ارتعاشاتی سازه‌ها مطابق با نتایج تجربی، تعیین صحیح خواص مکانیکی اجزای سازنده برای استفاده در روش‌های المان محدود می‌باشد. در جدول 1، خواص مکانیکی مربوط به پارچه کولار که برای تولید رویه‌های درونی-بیرونی بکاربرده شده است، توسط شرکت سازنده با توجه به استاندارد ASTM ارائه شده است. همچنین، خواص مکانیکی ریب‌های هلیکال و محیطی هسته مشبک که ترکیبی از الیاف کربن و شیشه می‌باشند، با توجه به قانون مخلوط‌ها و درصد حجمی الیاف‌ها تعیین می‌شود.

در گام پایانی، برای مونتاژ این سه رویه، از کلیرانس فاصله استفاده شد و در نهایت المان‌های آن‌ها به یکدیگر با استفاده از قید tie یکپارچه شدند.

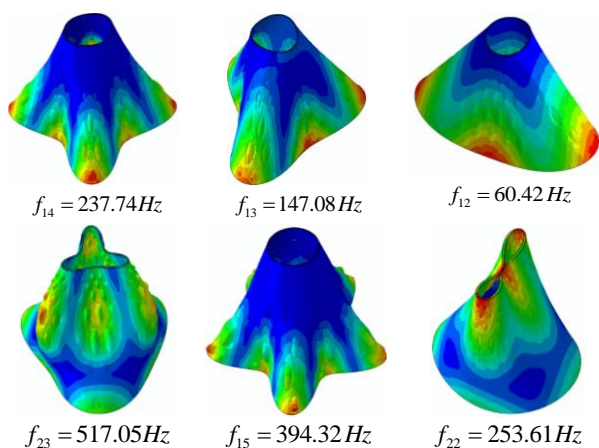


**Fig. 9** Comparison between natural frequencies and mode shapes predicted by the experimental and FE methods: (a) the first  $(m,n) = (1,2)$  and (b) second  $(m,n) = (1,3)$  mode shapes.

شکل 9 مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود آباکوس و روش تجربی برای (الف) اولین و (ب) دومین شکل مود

همچنین مهم‌ترین دلایل خطای قابل قبول در نتایج المان محدود، وجود تلورانس‌های کوچک در مدل‌سازی هندسی و تعیین دقیق خواص مکانیکی اجزای مختلف می‌باشد. به صورت کلی از مدل المان محدود پیشنهادی می‌توان برای طراحی و تحلیل رفتار مکانیکی گلوبال پوسته‌های مخروطی ساندویچی با هسته مشبک با دقت کافی استفاده نمود.

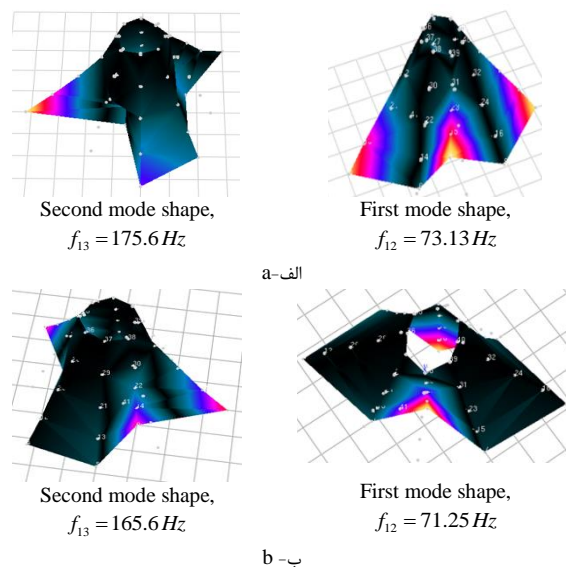
در شکل 10، شش شکل مود اول و فرکانس‌های طبیعی مطابق آن‌ها پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود آباکوس برای چنین پوسته مخروطی ساندویچی مشبک با شرایط تکیه‌گاهی دو سر آزاد نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، برای کوچک‌ترین مقدار فرکانس طبیعی چنین سازه‌ای تنها یک نیم موج در راستای طولی یال مخروط و دو موج کامل در راستای محیطی پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی ایجاد شده است. همچنین برای سه شکل مود اول مربوط به ارتعاشات پوسته مخروطی، تعداد نیم موج در راستای طولی ثابت باقی می‌ماند و فقط تعداد موج‌های در جهت محیطی افزایش می‌یابد.



**Fig. 10** The first six natural frequencies and mode shapes of the sandwich lattice conical shell predicted by the finite element method

همان‌طور که دیده می‌شود که تطابق قابل قبولی بین رفتار رزونانسی و فرم متحنی پاسخ‌های فرکانسی دو نمونه ساخته شده از پوسته مخروطی ساندویچی مشبک وجود دارد. همچنین اولین و دومین شکل مود استخراج‌شده بر مبنای آزمون‌های مودال برای دو نمونه در شکل 8 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل 8 مشاهده می‌شود که تطابق بسیار خوبی بین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای هر دو نمونه ساخته شده از پوسته مخروطی ساندویچی مشبک وجود دارد. برای مثال اختلاف فرکانس‌های طبیعی میان دو نمونه برای اولین و دومین شکل مود به ترتیب در حدود 3/6٪ می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طراحی مفهومی مراحل تولید، اجرای فرآیندهای ساخت اجزای مختلف پوسته مخروط ساندویچی شامل رویه‌های کولار و هسته مشبک کامپوزیتی و انجام آزمون‌های مودال با کمترین خطا ممکن انجام پذیرفته است.

برای دومین مثال اعتبارسنجی، توانایی و عملکرد روش المان محدود آباکوس برای مطالعه رفتار ارتعاشاتی پوسته‌های مخروطی سه‌جزئی با یک هسته مشبک کامپوزیتی ارزیابی می‌گردد.



**Fig. 8** Comparison between the modal test results predicted for samples (a) A and (b) B of the anisogrid lattice sandwich conical shell شکل 8 مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای نمونه‌های (الف) اول و (ب) دوم پوسته مخروطی ساندویچی

بدین منظور در شکل 9، فرکانس‌های طبیعی مطابق اولین و دومین شکل مودهای ارتعاشاتی حاصل از مدل المان محدود آباکوس با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود مدل المان محدود آباکوس می‌تواند فرم تغییرشکل‌ها و فرکانس‌های ارتعاشات خطی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید. مدل المان محدود بر طبق نرم‌افزار آباکوس مقادیر فرکانس‌های طبیعی برای اولین شکل مود 16٪ و برای دومین شکل مود 14٪ کمتر از نتایج آزمون مودال تخمین می‌زند. لازم به اشاره است که فرکانس‌های طبیعی بر اساس روش تجربی برای هر شکل مود میانگین نتایج حاصل از هر دو نمونه می‌باشد.

on the first-order shear deformation theory,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 154, No. 12, pp. 225-24, 2018.

- [9] Fallah, F., and Taati, E., “On the nonlinear bending and post-buckling behavior of laminated sandwich cylindrical shells with FG or isogrid lattice cores,” *Acta Mechanica*, Vol. 230, No. 6, pp. 2145-2169, 2019.
- [10] Chai, Y., Li, F., and Song, Z., “Nonlinear flutter suppression and thermal buckling elimination for composite lattice sandwich panels,” *AIAA Journal*, Vol. 57, No. 11, pp. 4863-4872, 2019.
- [11] Nazari, A., Naderi, A., Malekzadefard, K., and Hatami, A., “Experimental and numerical analysis of vibration of FML-stiffened circular cylindrical shell under clamp-free boundary condition,” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 9-20, 2019.
- [12] Shahgholian-Ghahfarokhi, D., and Rahimi, G., “New analytical approach for buckling of composite sandwich pipes with isogrid core under uniform external lateral pressure,” *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 65-93, 2021.
- [13] Karttunen, A. T., Reddy, J. N., and Romanoff, J., “Two-scale constitutive modeling of a lattice core sandwich beam,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 160, No. 3, pp. 66-75, 2019.
- [14] Li, C., Shen, H. S., and Yang, J., “Low-velocity impact response of cylindrical sandwich shells with auxetic 3D double-V meta-lattice core and FG GRC facesheets,” *Ocean Engineering*, Vol. 262, No. 10, pp. 112299, 2022.
- [15] Zarei, M., & Rahimi, G. H., “Buckling resistance of joined composite sandwich conical-cylindrical shells with lattice core under lateral pressure,” *Thin-Walled Structures*, Vol. 174, No. 5, pp. 109027, 2022.
- [16] Barbero, E. J., “Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus,” Second ed., CRC press, 2023.

شکل 10 شش شکل مود اول و فرکانس‌های طبیعی مطابق به آن‌ها پوسته مخروطی ساندویچی مشبک پیش‌بینی شده توسط حل المان محدود آباکوس

### 5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، تحلیل مودال تجربی و شبیه‌سازی المان محدود برای ارتعاشات آزاد پوسته‌های مخروطی ناقص ساندویچی سه‌جزئی ارائه شده است. بدین منظور، دو نمونه از چنین ساختار ساندویچی متشکل از رویه‌های همسان درونی و بیرونی از جنس پارچه کامپوزیتی کولار و یک هسته مشبک با سلول‌های شش‌ضلعی و ریب‌های ترکیبی از الیاف‌های کربن-شیشه ساخته شده است. ابعاد هندسی و جنس لایه نمونه‌های ساخته شده مطابق و سازگار با شرایط عملیاتی در کاربردهای صنعتی در نظر گرفته شده است. سپس آزمون‌های مودال بر روی دو نمونه برای تعیین پاسخ‌های فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای پوسته‌های مشبک ساندویچی تحت تحریک‌کننده هارمونیک بر مبنای جمع‌آوری داده‌ها از چهل نقطه (پنج مقطع عرضی در راستای یال و هشت نقطه در راستای محیطی در هر مقطع) توسط دستگاه سرعت‌سنج لیزری انجام می‌پذیرد. در بخش تئوری، شبیه‌سازی المان محدود متعددی برای تحلیل رفتار ارتعاشات آزاد پوسته مخروطی ساندویچی مشبک کامپوزیتی با لبه‌های آزاد با استفاده از المان‌های سه‌بعدی C3D8R در نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفته است. مقایسه نتایج تجربی دو نمونه از پوسته ساندویچی نشان می‌دهد تطابق قابل قبولی بین رفتار رزونانسی وجود دارد و حداکثر اختلاف فرکانس‌های طبیعی برای اولین و دومین شکل مود به ترتیب در حدود 3/ و 6/ می‌باشند. همچنین مدل‌سازی المان محدود آباکوس می‌تواند شکل مودها و فرکانس‌های ارتعاشات خطی مطابق را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید، برای نمونه فرکانس‌های طبیعی مطابق با اولین و دومین شکل مود به ترتیب 16/ و 14/ کمتر از نتایج تجربی تخمین زده شده است.

### 6- مراجع

- [1] Vasiliev, V. V., and Morozov, E. V., “Advanced mechanics of composite materials and structures,” Fourth ed., Elsevier, 2018.
- [2] Davies, J. M., “Lightweight sandwich construction,” First ed., John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Vinson, J. R., “The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials,” First ed., Routledge, New York, 1999.
- [4] Shatov, A. V., Burov, A. E., and Lopatin, A. V., “Buckling of composite sandwich cylindrical shell with lattice anisogrid core under hydrostatic pressure,” In *Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing*, Vol. 1546, No. 1, pp. 01213, 2020.
- [5] Zarei, M., Rahimi, G. H., and Hemmatnezhad, M., “Global buckling analysis of laminated sandwich conical shells with reinforced lattice cores based on the first-order shear deformation theory,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 187, No. 12, pp. 10587, 2020.
- [6] Yang, J. S., Liu, Z. D., Schmidt, R., Schröder, K. U., Ma, L., and Wu, L. Z., “Vibration-based damage diagnosis of composite sandwich panels with bi-directional corrugated lattice cores,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 131, No. 4, pp. 105781, 2020.
- [7] Shahgholian-Ghahfarokhi, D., Rahimi, G., Zarei, M., and Salehipour, H., “Free vibration analyses of composite sandwich cylindrical shells with grid cores: Experimental study and numerical simulation,” *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 50, No. 2, pp. 687-706, 2022.
- [8] Fallah, F., Taati, E., and Asghari, M., “Decoupled stability equation for buckling analysis of FG and multilayered cylindrical shells based