

بررسی تجربی و عددی پارامترهای موثر بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های ساده و مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی

علی طالع‌زاده لاری*
حسین قربانی منقاری
غلامحسین رحیمی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار، ایران
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

با توجه به کاربرد فراوان پوسته‌های ساده و مشبک کامپوزیتی در صنایع مختلف بررسی رفتار ارتعاشی آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، اثر پارامترهای مختلف بر ارتعاشات این پوسته‌ها به صورت تجربی و عددی مطالعه شده است. برای انجام آنالیز مودال نمونه‌ها به روش رشته‌پیچی الیاف ساخته شده است. خواص مکانیکی الیاف و زمینه و نیز درصد حجمی الیاف به کار رفته در پوسته و ریب طبق تست‌های استاندارد تعیین شده و نهایتاً خواص مکانیکی هر یک از اجزا به کمک روابط میکرومکانیک محاسبه شده است. از این خواص برای مدل‌سازی دقیق مسئله در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مدل عددی به کمک نتایج تست تجربی اعتبارسنجی شده است. در نهایت با استفاده از این مدل اثر پارامترهای موثر بر ارتعاشات پوسته‌های کامپوزیتی مطالعه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن تقویت‌کننده الزاماً فرکانس طبیعی پوسته را افزایش نمی‌دهد. از نقطه نظر ارتعاشاتی، شبکه‌بندی محیطی، کاگوم و مثلثی شرایط نسبتاً مشابهی دارند که با توجه به سهولت ساخت رینگ‌های محیطی، این نوع شبکه‌بندی بر سایرین ارجحیت دارد.

واژه‌های کلیدی: پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی، پوسته مشبک، تست تجربی، مطالعه عددی، ارتعاشات.

Experimental and numerical investigation of the effective parameters on vibrational behavior of unstiffened and stiffened composite cylindrical shells

A. Talezadelari
H. Ghorbani Menghari
Gh. H. Rahimi

Department of Mechanical Engineering, Larestan university, Lar, Iran
Department of Mechanical Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran
Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Due to the widespread use of unstiffened and stiffened composite shells in different industries, investigating their vibrational behavior has great importance. In this paper, the effects of different parameters on the vibration of these shells are studied using experimental and numerical analysis. Specimens used for modal analysis are fabricated by filament winding machine. The mechanical properties of fibers and resin matrix are determined based on the standard tests as the fiber volume fraction in the shell and the stiffeners. Finally, the mechanical properties are calculated using micromechanical relations. These properties are used for finite element modeling by ABAQUS package. FE results are validated in comparison with empirical tests. Finally, the effects of different parameters on the vibrational behavior of composite shells are studied using this FE model. The results show that using the stiffeners does not necessarily increase the natural frequencies of the shell. From the vibrational point of view, the results of the stiffened shell with circumferential rings, kagome grid, and triangle grid are similar. So, considering the manufacturing procedure, stiffening the shell with circumferential rings is preferred.

Keywords: Cylindrical composite shell, stiffened shell, Experimental Study, Numerical Analysis, Vibration.

انجام شده است که از میان آنها می‌توان به پژوهش‌های هفت‌چناری و همکارانش [۱]، آمابیلی و ردی [۲]، آمابیلی [۳]، کوو و همکارانش [۴] و جین و همکارانش [۵] اشاره نمود. به منظور حفظ اختصار از تشریح بیشتر این مقالات صرف‌نظر شده است.

آغاز پژوهش در زمینه ارتعاشات پوسته‌های تقویت‌شده به دهه ۵۰ میلادی باز می‌گردد. البته تحقیقات انجام شده در آن زمان بر روی پوسته‌های ایزوتروپ تقویت شده بوده‌اند. به عنوان مثال می‌توان به پژوهش هومپن [۶] در سال ۱۹۵۸ اشاره نمود. وی با استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های متعامد را مطالعه کرده است. بررسی ارتعاشات پوسته‌های ایزوتروپ تقویت‌شده تا سال‌های اخیر نیز ادامه داشته است که جهت حفظ اختصار از مرور مقالات مربوط به آن

۱- مقدمه

سازه‌های کامپوزیتی به سبب خواص منحصر به فردی چون نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر رطوبت و خوردگی کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند. در این میان پوسته‌های کامپوزیتی از جمله سازه‌های پرکاربرد هستند که از سال‌ها پیش مورد توجه بوده‌اند. یکی از روش‌های بهبود کارایی پوسته‌های کامپوزیتی استفاده از انواع تقویت‌کننده‌های محیطی، محوری و مارپیچ است. استفاده از شبکه تقویت‌کننده مقاومت پوسته‌ها برای تحمل بارگذاری‌های مختلف را افزایش می‌دهد. علاوه بر تحمل بار، پایداری این سازه‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا آنالیز ارتعاشاتی پوسته‌های ساده و مشبک کامپوزیتی مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. مطالعات فراوانی در زمینه ارتعاشات پوسته‌های ساده کامپوزیتی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.talezadeh@lar.ac.ir

اجتناب شده و مطالعات به پوسته‌های مشبک کامپوزیتی محدود شده است.

یکی از نخستین پژوهش‌ها در زمینه ارتعاشات پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده توسط پروکوپنکو [۷] در سال ۱۹۸۰ انجام شد. وی بر اساس روش انرژی ارتعاشات پوسته‌های تقویت‌شده با رینگ‌های محیطی را مطالعه کرده است. در سال ۱۹۹۳ برت و کیم [۸] ارتعاشات آزاد پوسته‌های کامپوزیتی با دو نوع تقویت‌کننده محیطی و طولی را بررسی نموده‌اند. ایشان در این پژوهش پنج نظریه پوسته مختلف را مورد استفاده قرار داده و نتایج آنها را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. ژائو و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۲ ارتعاشات پوسته دوار لایه‌ای با تکیه‌گاه ساده که توسط تقویت‌کننده‌های محیطی و طولی تقویت شده است، را بررسی کرده‌اند. این تحلیل به کمک روش انرژی و به دو صورت انجام شده است. (۱) به کمک روش تغییرات، که در آن تقویت‌کننده‌ها به صورت اجزای جداگانه تحلیل شده‌اند. (۲) به کمک روش سفتی متوسط، که در آن سفتی تقویت‌کننده‌ها به صورت یکنواخت به پوسته اضافه شده است. در سال ۲۰۱۰ همت‌نژاد و رحیمی [۱۰] ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای ارتوتروپ مشبک با تکیه‌گاه ساده را بررسی نموده‌اند. در این مطالعه معادلات بر اساس نظریه ساندروز نوشته شده است و اثرات تقویت‌کننده به کمک روش معادل‌سازی لحاظ شده است. در سال ۲۰۱۱ جم و همکارانش [۱۱] ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای مشبک با تکیه‌گاه آزاد را بر اساس نظریه لاو و به کمک روش گلرکین مطالعه نموده‌اند. تاثیر زاویه تقویت‌کننده و اثر برخی پارامترهای هندسی دیگر بررسی شده است. در سال ۲۰۱۴، لی و کیاوو [۱۲] با استفاده از نظریه لایه مرزی^۱ به مطالعه و بررسی ارتعاشات غیرخطی پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های مورب در مجاورت بستر الاستیک و تحت بارهای محوری استاتیک و متناوب پرداختند. معادلات بر اساس نظریه پوسته دائل استخراج شده است. به منظور وارد نمودن اثرات غیرخطی هندسی، از روابط کرنش- تغییر مکان فون کارمن^۲ بهره جسته شده است. ایشان یک روش متوسط‌گیری توسعه‌یافته را به منظور در نظر گرفتن تعامل پوسته-تقویت‌کننده با محاسبه سفتی خمشی و کوپلینگ ناشی از پوسته و تقویت‌کننده‌ها در محل تماس، ارائه نموده‌اند. در نهایت به کمک روش اختلال تکین^۳ معادلات حرکت حل شده و فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات خطی و غیرخطی استخراج شده است. رحیمی و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۴ رفتار ارتعاشی استوانه تقویت‌شده ایزوتروپ و کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند و برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف فرکانس طبیعی سازه را به دست آوردند. حل تحلیلی بر پایه نظریه ساندروز و به کمک روش معادل‌سازی کیدانه انجام شده است. همچنین از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS نیز برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است. اثر پارامترهای هندسی، شرایط مرزی و زاویه تقویت‌کننده‌ها بر فرکانس طبیعی مطالعه شده است. در سال ۲۰۱۴ همت‌نژاد و همکارانش [۱۴] ارتعاشات آزاد استوانه تقویت شده کامپوزیتی را بر مبنای نظریه تنش برشی مرتبه اول مورد مطالعه قرار دادند. ایشان نتایج حل تحلیلی را با

نتایج به دست آمده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS اعتبارسنجی نموده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به طور کلی فرکانس طبیعی پوسته تقویت شده بیشتر است اما با افزایش ضخامت تاثیر تقویت‌کننده‌ها کاهش یافته و برای یک ضخامت مشخص، حضور تقویت‌کننده اثر چندانی روی فرکانس ندارد. همت‌نژاد و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۱۵ مطالعه کامل‌تری بر روی ارتعاشات پوسته‌های کامپوزیتی مشبک انجام دادند. ایشان در این پژوهش ارتعاشات پوسته مشبک را به صورت تجربی نیز بررسی نموده و نتایج حاصله را با نتایج تحلیلی و عددی مقایسه نموده‌اند.

پژوهشی که توسط همت‌نژاد و همکارانش انجام شده است [۱۵] را می‌توان کامل‌ترین و جامع‌ترین پژوهش در زمینه ارتعاشات پوسته‌های مشبک کامپوزیتی دانست. اما این پژوهش بیشتر بر حل تحلیلی ارتعاشات پوسته‌های مشبک بر پایه روش معادل‌سازی تکیه دارد و حل عددی و تجربی و نیز مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف کمتر مورد توجه آن قرار گرفته است. ضمن اینکه در این بررسی صرفاً یک نوع پوسته مشبک با شبکه‌بندی لوزی بررسی شده است. شبکه تقویت‌کننده از سه جفت ریب مارپیچ تشکیل شده است که زاویه قرارگیری آنها به گونه‌ای است که کمتر از یک سلول واحد در راستای طولی پوسته به وجود آمده است. این در حالی است که در مصارف صنعتی شبکه‌بندی‌هایی به مراتب چگال‌تر مورد نیاز است. این امر لزوم انجام مطالعاتی بر روی پوسته‌های مشبک با شبکه‌بندی چگال‌تر را نشان می‌دهد. ضمن اینکه انواع دیگر شبکه‌بندی‌ها نیز مورد توجه قرار نگرفته است.

در پژوهش حاضر سعی شده است تا برای پوشش این موارد، انواع شبکه‌های مختلف تقویت‌کننده (طولی، محیطی، مارپیچ و ترکیب آنها) مطالعه شود. همچنین، اثر پارامترهای موثر بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های مشبک کامپوزیتی به کمک مدل المان محدود مورد بررسی قرار گیرد. برای اعتبارسنجی این مدل از نتایج تست تجربی استفاده شده است. ضمن اینکه برای افزایش دقت نتایج تست‌های تجربی، خواص واقعی پوسته و تقویت‌کننده‌ها با انجام آزمایشات لازم بر روی الیاف، رزین و نمونه‌های نهایی تعیین شده است. از نتایج این تحقیق می‌توان برای طراحی و ساخت انواع سازه‌های استوانه‌ای مشبک بهره جست.

۲- مطالعه تجربی

۲-۱- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها از الیاف شیشه و ماتریس رزین اپکسی استفاده شده است. ماتریس رزین اپکسی از ترکیب رزین CY-219 و سخت‌کننده HY-5161 با نسبت ترکیب ۲ به ۱ تشکیل شده است. نمونه‌ها به روش رشته‌پیچی دستی ساخته شده‌اند. پوسته از چهار لایه با لایه‌چینی $[60^\circ \pm]_s$ تشکیل شده که ضخامت ۱/۳ میلی‌متر را ایجاد می‌نماید. ضمن اینکه شعاع و طول نمونه‌ها به ترتیب ۸۰ و ۳۰۰ میلی‌متر است.

قالب ساخت نمونه‌ها از جنس پلی‌اتیلن است که به شکل مناسبی ماشین‌کاری شده است تا شیارهای مارپیچی بر روی آن ایجاد شود. این شیارها در ادامه به وسیله الیاف آغشته به رزین اپکسی پر خواهند شد و ریب‌های تقویت‌کننده را تشکیل خواهند داد. ماشین‌کاری قالب

^۱ boundary layer theory

^۲ Von Karman

^۳ singular perturbation method

خواص مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده‌ها محاسبه شده است. لازم به ذکر است که چگالی الیاف و ماتریس رزین اپسکی نیز با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد و به ترتیب مقادیر ۲/۵۸ و ۱/۰۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای آنها به دست آمد که با چگالی اسمی آنها برابر بود. از این رو از ذکر جزئیات این قسمت اجتناب شده است.

۲-۲-۱ تعیین خواص مکانیکی الیاف

برای تعیین مساحت مقطع الیاف نیاز است که علاوه بر چگالی، وزن طول مشخصی از الیاف را داشته باشیم. بدین منظور به کمک تجهیزات موجود در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۱۰۰ متر از الیاف به دور دستگاه مخصوصی پیچیده شده و وزن آن اندازه‌گیری شد که مقدار ۹/۸۷ گرم برای آن به دست آمد. بدین ترتیب می‌توان به راحتی مساحت مقطع الیاف را تعیین نمود. با فرض یکنواخت و دایره‌ای بودن این مقطع، قطر الیاف برابر ۲۲۱ میکرومتر خواهد بود.

در گام بعد تست کشش الیاف مطابق استاندارد ASTM D2256 و با استفاده از دستگاه کشش الیاف INSTRON 5566 موجود در دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. شکل ۳ نمایی از این دستگاه و نحوه قرارگیری الیاف در دستگاه را نشان می‌دهد. طول موثر الیاف قرار گرفته میان فک پنوماتیک دستگاه ۲۰ میلی‌متر است. با توجه به هندسه الیاف می‌توان نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده از این تست را به نمودار تنش-کرنش تبدیل نموده و مدول الاستیسیته در راستای طولی (E_{11}) و استحکام کششی الیاف (σ_f) را محاسبه کرد. ۲۵ نمونه از پنج دوک مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و با میانگین‌گیری از نتایج آنها، مدول الاستیسیته در راستای طولی و استحکام کششی الیاف به ترتیب برابر ۵۳/۶۶ گیگاپاسکال و ۱۰۰۰/۳۴ مگاپاسکال محاسبه شده است. از آنجا که الیاف شیشه ماده‌ای ایزوتروپ است، خواص مکانیکی آن در جهات محوری و عرضی یکسان خواهد بود [۱۶].

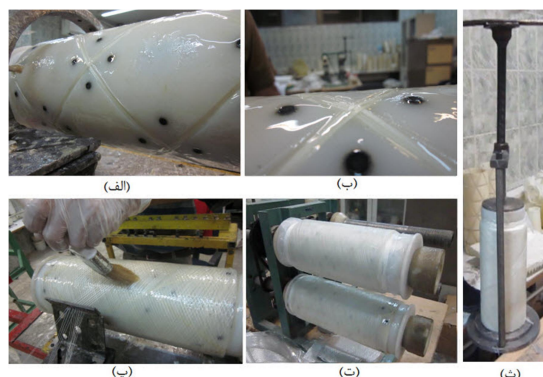
۲-۲-۲ تعیین خواص مکانیکی ماتریس رزین اپکسی

به منظور تعیین خواص مکانیکی ماتریس رزین اپکسی نمونه‌های استاندارد مطابق استاندارد ASTM D638 و با ترکیب ترکیب رزین و سخت‌کننده به نسبت ۲ به ۱ ساخته شده و تحت تست کششی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده در شکل ۴ نمایش داده شده است. طبق این نمودارها، مدول الاستیسیته و استحکام کششی به ترتیب برابر ۰/۸۸۱۷ گیگاپاسکال و ۱۵/۱۲ مگاپاسکال محاسبه شده است.

۲-۲-۳ تعیین درصد حجمی الیاف

درصد حجمی الیاف به کار رفته در پوسته و ریب با آزمایش سوزاندن قسمتی از آنها طبق استاندارد ASTM-D 2584 تعیین می‌شود. بدین منظور، قطعاتی از پوسته و ریب بریده شده و درون کوره قرار داده می‌شود. دمای کوره طی یک ساعت رفته رفته از دمای محیط به دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس رسانده شده و به مدت یک ساعت در این دما ثابت نگه داشته می‌شود. طی این عملیات رزین اپکسی به طور کامل سوخته و از بین خواهد رفت و فقط الیاف باقی خواهند ماند. بدین ترتیب می‌توان با اندازه‌گیری وزن نمونه قبل و بعد از سوزانده شدن، درصد وزنی الیاف در پوسته و ریب را محاسبه نمود. با توجه به چگالی الیاف و زمینه می‌توان کسر حجمی الیاف در پوسته و ریب را تعیین

پلی‌ایتیلنی آن را به قسمت‌های متعددی تقسیم می‌نماید که این قسمت‌ها به وسیله پیچ‌هایی به هسته داخلی متصل شده‌اند. نحوه اتصال این قطعات به هسته میانی در شکل ۱ مشخص است. پس از ساخت و خشک شدن نمونه، پیچ‌های اتصال‌دهنده قالب خارجی به هسته میانی باز شده و هسته میانی و قطعات قالب خارجی جدا می‌شود. برای مطالعه حاضر سه نوع شبکه‌بندی مختلف بررسی شده است که در شکل ۲ نشان داده شده و مشخصات آنها در جدول ۱ بیان شده است.



شکل ۱- مراحل ساخت نمونه کامپوزیتی مشبک، (الف) ساخت ریب‌ها (ب) پر شدن شیارهای ایجادکننده ریب‌ها (پ) پیچش پوسته خارجی (ت) پخت نمونه در دمای اتاق (ث) جداسازی قالب از نمونه



شکل ۲- قالب‌های پلی‌ایتیلنی ساخت نمونه‌ها

جدول ۱- مشخصات قالب‌های ساخته شده

شماره	سطح مقطع ریب‌ها (mm×mm)	تعداد جفت ریب‌ها	تعداد سلول واحد در طول استوانه	وزن نمونه (gr)
S	-	-	-	۲۴۹/۲
A	۶ × ۶	۳	۱/۲۵	۳۹۶/۴
C	۶ × ۴/۵	۳	۲	۳۹۹/۷
D	۶ × ۶	۴	۲/۵	۴۳۹/۷

۲-۲-۴ تعیین خواص مکانیکی

نخستین گام برای تعیین خواص مکانیکی پوسته و ریب، مشخص نمودن خواص مکانیکی الیاف و ماتریس رزین اپسکی است. در مرحله بعد به کمک روابط میکرومکانیک، و با توجه به کسر حجمی الیاف،

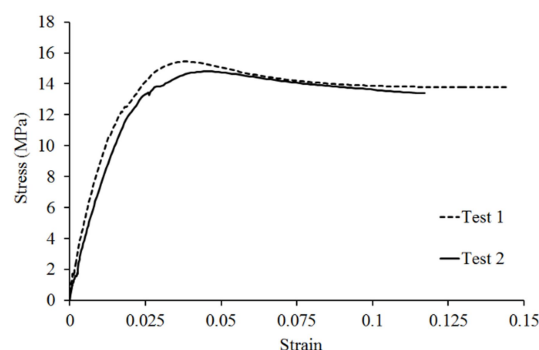
نمود؛ که به ترتیب برابر ۱۸/۰۱ درصد و ۲۹/۱۷ درصد می‌باشند. شکل ۵ نمایی از قسمتی از پوسته و ریب سوزانده شده را نشان می‌دهد.

۲-۴- محاسبه خواص مکانیکی پوسته و ریب

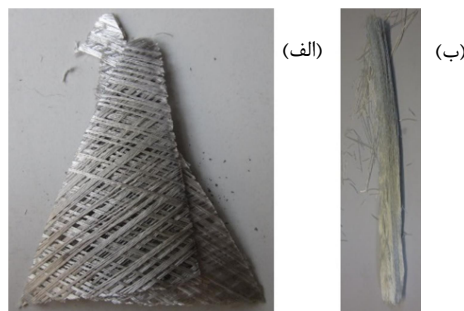
پس از تعیین خواص مکانیکی الیاف، رزین اپکسی و نیز کسرجمی الیاف در پوسته و ریب، در این قسمت خواص مکانیکی پوسته و ریب با استفاده از روابط میکرومکانیک ارائه شده در مرجع [۱۶] (روابط (۱) تا (۷)) محاسبه شده و در جدول ۲ خلاصه شده است. ضمن اینکه ضریب پواسون الیاف و رزین اپکسی نیز با توجه به مرجع [۱۶] به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۳۶ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- تست کشش الیاف



شکل ۴- نتایج تست کشش ماتریس رزین اپکسی



شکل ۵- قسمتی از (الف) پوسته و (ب) ریب سوزانده شده

$$\rho = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (۱)$$

$$E_1 = E_f v_f + E_m v_m \quad (۲)$$

$$\vartheta_{12} = \vartheta_f v_f + \vartheta_m v_m \quad (۳)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{E_f} + \frac{\eta_2 v_m}{E_m} \right], \quad \eta_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{G_m}{G_{12}} \right) \quad (۴)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{G_{f12}} + \frac{\eta_2 v_m}{G_m} \right], \quad (۵)$$

$$\eta_G = \frac{1}{4(1 - \vartheta_m)} \left(3 - 4\vartheta_m + \frac{G_m}{G_f} \right)$$

$$G_{23} = G_m / \left(1 - \sqrt{v_f \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}} \right)} \right) \quad (۶)$$

$$v_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad (۷)$$

جدول ۲- خواص مکانیکی پوسته و تقویت کننده

مشخصه	پوسته	تقویت کننده
$\rho \text{ (gr/cm}^3\text{)}$	۱/۳۲۸	۱/۵۰۶
$E_1 \text{ (GPa)}$	۱۰/۳۸۷	۱۶/۲۶۱
$E_2 = E_3 \text{ (GPa)}$	۱/۲۵۴	۱/۵۷۵
$G_{12} = G_{13} \text{ (GPa)}$	۰/۴۳۸	۰/۵۳۶
$G_{23} \text{ (GPa)}$	۰/۵۷۷	۰/۶۹۲
$\vartheta_{12} = \vartheta_{13}$	۰/۳۳۵	۰/۳۱۹
ϑ_{23}	۰/۱۲۶	۰/۱۳۷

۲-۳- تست مودال

یکی از مهم‌ترین موارد در انجام تست مودال فراهم آوردن شرایط تکیه‌گاهی مناسب است. برای انجام تست با شرایط مرزی آزاد-آزاد نمونه به وسیله دو نخ به صورت معلق در هوا قرار گرفت. این امر به گونه‌ای صورت پذیرفت که هیچ گونه قیدی برای سازه ایجاد نشده و سازه بتواند آزادانه در تمامی جهات حرکت نماید.

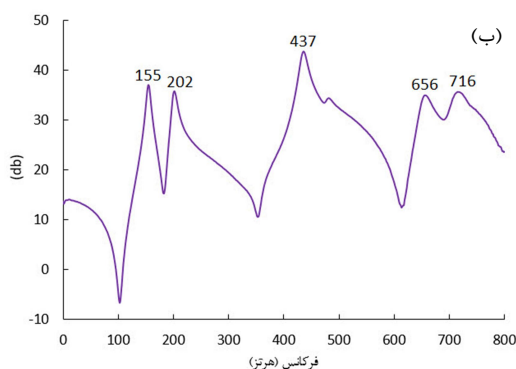
برای اعمال تحریک خارجی از چکش ضربه B&K ۸۲۰۲ استفاده شده است. با اعمال ضربه توسط این چکش، نیرو توسط ترنسیدوسر^۱ B&K ۸۲۰۰ که در داخل آن نصب شده است اندازه‌گیری می‌شود. پاسخ این ضربه توسط شتابسنجی که در نزدیکی محل اصابت ضربه به نمونه متصل شده است، اندازه‌گیری می‌شود. از آنجا که یکی از عوامل ایجاد خطا در آنالیز مودال سازه‌های سبک، اضافه شدن جرم اضافی به سازه است؛ در این آزمایش از شتابسنجی با دقت بالا و وزن ۱۴ گرم استفاده شد تا در حد امکان تأثیر اضافه شدن جرم شتابسنج به سازه، کاهش یابد. هرچند وزن شتابسنج در برابر وزن نمونه‌ها به طور کامل قابل اغماض نیست و ممکن است به علت وزن پایین نمونه‌ها، ایجاد نویز و خطا نماید. شکل ۶ نحوه قرارگیری نمونه و اتصال شتابسنج را نشان می‌دهد.

اطلاعات به دست آمده از چکش و شتابسنج به آنالیزگر دو کاناله B&K ۲۰۳۵ داده شده و پس از رسم تابع پاسخ فرکانسی^۲، با تحلیل آن بر اساس روش برازش دایره^۳ فرکانس طبیعی نمونه استخراج شده است. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌ها در آنالیز مودال است که دقت به

¹ Transducers

² Frequency Response Functions (FRF)

³ Circle Fitting



شکل ۷- منحنی پاسخ فرکانسی نمونه D با تحریک در (الف) نقطه میانی (ب) نقطه انتهایی

۳- مطالعه عددی

۳-۱- مدل سازی

مطالعه عددی ارتعاشات پوسته‌های ساده و مشبک کامپوزیتی به کمک نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. از آنجا که ضخامت پوسته نسبت به سایر ابعاد آن بسیار کوچک است پوسته به صورت ماده الاستیک و از نوع لایه‌ای در نظر گرفته شده و در قسمت کامپوزیت لای آپ^۲ زوایای لایه‌های مختلف تعریف شده است. همچنین المان پوسته از نوع المان پوسته مرسوم^۳ انتخاب شده است. برای تخصیص خواص لازم است دستگاه مختصات محلی به گونه‌ای بر روی ریب تعریف شود که محور آن همواره در امتداد مارپیچ تقویت‌کننده باشد. به علت ساختار تک‌جهته تقویت‌کننده‌ها، از یک لایه با زاویه صفر درجه استفاده شده است. همچنین برای ایجاد شرایط تکیه‌گاهی آزاد-آزاد، نیازی به اعمال شرط خاصی روی لبه‌های پوسته نیست. برای مش‌بندی پوسته و ریب به ترتیب از المان S4R و C3D8R استفاده شده است. اندازه المان‌ها نیز با انجام آنالیز همگرایی مش برابر ۳ میلی-متر در نظر گرفته شده است که از بیان جزئیات آن اجتناب شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی مدل المان محدود

هرچند در ادامه نتایج مدل المان محدود با نتایج تست‌های تجربی مقایسه شده است، اما نتایج این مدل به کمک نتایج تحلیلی، عددی و تجربی موجود در سایر مقالات نیز اعتبارسنجی شده است. بدین منظور، ارتعاشات انواع پوسته‌های ساده و مشبک، ایزوتروپ و کامپوزیتی، با تکیه‌گاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به علت محدودیت تعداد صفحات مقاله فقط به ذکر یک مورد اکتفا می‌شود.

در سال ۲۰۱۵ همت‌نژاد و همکارانش ارتعاشات پوسته‌ی مشبک کامپوزیتی با شرایط تکیه‌گاهی آزاد-آزاد را بررسی کرده‌اند [۱۵]. ارتفاع، شعاع و ضخامت پوسته به ترتیب ۳۰۰، ۷۰ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فرض شده که پوسته از ۱۰ لایه با لایه‌چینی [۷۲±] تشکیل شده است. برای تقویت پوسته از سه جفت ریب مارپیچ با زاویه ۳۰ درجه نسبت به محور طولی استوانه استفاده شده است. خواص اسمی پوسته و ریب در جدول ۳ آورده شده است. در جدول ۴ نتایج

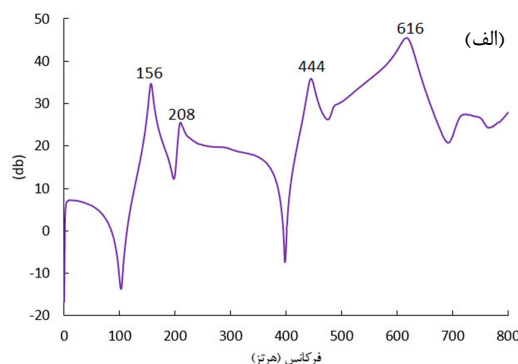
مراتب بالاتری نسبت به روش‌های ساده‌تر نظیر برداشت قله^۱ دارد. این روش برای استخراج فرکانس طبیعی از داده‌های نزدیک به قله‌های نمودار استفاده می‌کند. از دیدگاه نظری اگر داده‌های تابع پاسخ فرکانسی یک سیستم یک درجه آزادی به صورت نایکوئیست (جمله حقیقی بر حسب تجملهرم موهومی) رسم شود، شکل حاصل یک دایره خواهد بود. ثابت می‌شود که فرکانس طبیعی در مکانی واقع است که نرخ تغییر طول کمان، روی دایره نایکوئیست بیشینه باشد. برای سیستم‌های با چند درجه آزادی به ازای هر مود فرکانسی چنین دایره-ای خواهیم داشت.

دستگاه مورد استفاده قابلیت اندازه‌گیری بازه‌های فرکانسی مختلف را دارد که با توجه به وزن پایین نمونه‌ها و برآورد اولیه فرکانس طبیعی، بازه صفر تا ۸۰۰ هرتز انتخاب شده است. برای پردازش سیگنال‌ها از ۸۰۰ خط فرکانسی با فاصله یک هرتز استفاده شده است.

می‌دانیم که در هر مود ارتعاشی گره‌هایی وجود دارد که اندازه‌گیری فرکانس مربوطه در آنها ممکن نیست. از این رو جهت اطمینان از اینکه فرکانسی مغفول باقی نمانده باشد، برای هر نمونه در دو نقطه (وسط پوسته و نزدیک انتها) ضربه چکش اعمال شده و نتایج استخراج شده است. ضمن اینکه برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج در هر نقطه آزمایش دو بار تکرار شده است تا از صحت و دقت نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود. نتایج نهایی هر نقطه میانگین مقادیر به دست آمده از دو بار تکرار هستند. ضمن اینکه نتایج نهایی گزارش شده از تلفیق نتایج مربوط به دو نقطه حاصل شده است. به عنوان نمونه، منحنی‌های پاسخ فرکانسی مربوط به ضربه اعمال شده به دو نقطه (به ترتیب وسط و نزدیک انتها) نمونه‌ی D در شکل ۷ رسم شده است.



شکل ۶- نمونه‌های ساده و مشبک آماده شده برای تست مودال



² Composite Layup

³ Conventional Shell

¹ Peak Picking

المان محدود و تست تجربی این پژوهش با نتایج به دست آمده از مدل المان محدود حاضر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل شده تطابق خوبی با نتایج عددی و آزمایشگاهی این مقاله دارد. این مقایسه روشن می‌سازد که مدل ABAQUS تهیه شده کاملاً قابل اعتماد است و می‌توان از آن برای تحلیل‌های دیگر استفاده نمود.

جدول ۳- خواص اسمی پوسته و ریب مرجع [۱۵]

مشخصه	پوسته	تقویت کننده
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	۱۴۴۷	۱۴۰۶
$E_1 \text{ (GPa)}$	۲۱٫۷۱	۱۹٫۵۶
$E_2 = E_3 \text{ (GPa)}$	۵٫۶۰۲	۵٫۲۷
$G_{12} = G_{13} \text{ (GPa)}$	۱٫۹۹	۱٫۸۹
$G_{23} \text{ (GPa)}$	۲٫۶۰	۲٫۲۶
ν_{12}	۰٫۲۷۳	۰٫۲۷۶

جدول ۴- نتایج مدل حاضر و نتایج مرجع [۱۵]

شماره مود	مدل المان محدود حاضر	مرجع [۱۵]	
		حل المان محدود	تست تجربی
۱	۱۸۸/۹۲	۱۹۰/۵۴	۱۶۹/۰۷۳
۲	۱۸۸/۹۹	۱۹۰/۶۲	۱۷۱/۳۲۱
۳	۲۱۹/۹۲	۲۲۱/۳۹	۲۲۳/۳۰
۴	۲۲۰/۰۶	۲۲۱/۴۶	۲۲۹/۱۱
۵	۵۲۸/۵۵	۵۳۰/۷۰	۴۴۸/۸۱۹
۶	۵۳۱/۳۱	۵۳۴/۸۱	۴۶۱/۶۹
۷	۵۴۷/۰۷	۵۴۵/۰۶	۴۸۶/۷۸
۸	۵۷۸/۱۱	۵۸۱/۹۶	۵۷۵/۵۳۷
۹	۸۲۴/۰۱	۸۲۲/۴۲	۷۰۰/۱۲۵
۱۰	۸۹۸/۲۳	۹۰۳/۶۵	۸۷۲/۵۳

۴- ارائه نتایج و بحث در نتایج

۴-۱- نتایج تست تجربی

علاوه بر اعتبارسنجی مدل المان محدود حاضر به کمک نتایج مراجع مختلف، در این بخش نتایج این مدل در کنار نتایج حاصل از پژوهش تجربی در جدول ۵ ارائه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل المان محدود تهیه شده به خوبی رفتار ارتعاشی پوسته ساده و مشبک کامپوزیتی را پیش‌بینی می‌نماید. اختلاف نتایج عددی و تجربی کمتر از ۱۰٪ است که با توجه به خطاهای موجود در ساخت نمونه‌ها و انجام تست‌های تجربی (تعیین خواص، وزن حسگر شتاب‌سنج و آنالیز مودال) قابل توجیه است. پس از اطمینان از صحت و دقت مدل المان

محدود تهیه شده، در ادامه از این مدل برای مطالعه پارامتری عوامل مختلف تاثیرگذار بر فرکانس چنین پوسته‌هایی استفاده شده است.

۴-۲- مطالعه پارامتری

برای مطالعه اثر هر پارامتر ابتدا یک هندسه پایه تعریف شده است. در ادامه با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، تاثیر پارامتر مذکور بررسی شده است. برای مطالعه پارامترهای مؤثر در ارتعاشات پوسته کامپوزیتی استوانه‌ای، ارتفاع، شعاع و ضخامت آن به ترتیب برابر ۸۰، ۳۰۰ و ۱ میلی‌متر انتخاب شده است. همچنین، پوسته به صورت چهار لایه و با لایه‌چینی $[60^\circ \pm]_S$ انتخاب شده است. سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها نیز به صورت مربعی به ضلع ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی پوسته و تقویت‌کننده‌ها مطابق جدول ۲ لحاظ شده است. ضمن اینکه شرایط مرزی تکیه‌گاهی به صورت آزاد-آزاد فرض شده است.

۴-۲-۱- اثر نوع تقویت کننده

افزودن شبکه تقویت‌کننده به پوسته کامپوزیتی موجب افزایش همزمان سفتی و وزن سازه می‌شود. لذا، فرکانس طبیعی سازه الزاماً افزایش نمی‌یابد و نمی‌توان بدون بررسی دقیق، تغییرات رفتار فرکانسی ناشی از افزودن تقویت‌کننده به پوسته ساده را به راحتی پیش‌بینی نمود. در این بخش اثر پارامترهای مختلف پوسته مشبک مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی انواع تقویت‌کننده‌های طولی، محیطی، مارپیچ و ترکیبی مطالعه شده است.

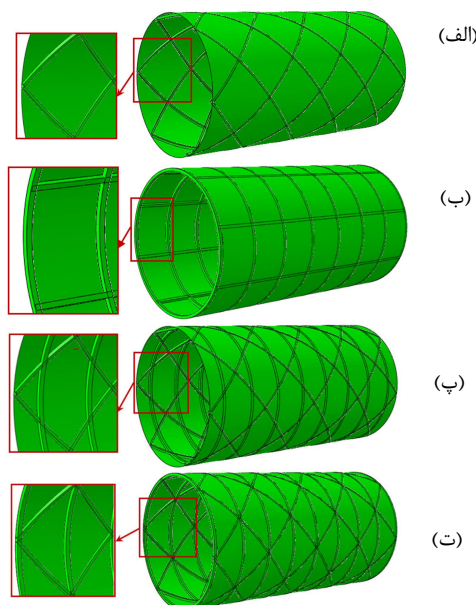
برای تقویت پوسته توسط تقویت‌کننده‌های طولی، آنها با فواصل محیطی یکسان در راستای طولی قرار داده شده‌اند. همچنین برای تقویت پوسته به وسیله تقویت‌کننده‌های محیطی، دو رینگ در دو انتهای پوسته قرار داده شده است و سایر تقویت‌کننده‌های محیطی نیز با فواصل یکسان در طول استوانه قرار گرفته‌اند. تغییرات فرکانس طبیعی به ازای تعداد مختلف تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن ریب‌های طولی فرکانس طبیعی پوسته را کاهش می‌دهد. این مسئله بدان معناست که اثر تقویت‌کننده‌های طولی بر افزایش وزن مجموعه بیشتر از افزایش سفتی آن است و استفاده از آنها برای ارتقای وضعیت ارتعاشی پوسته مناسب نیست. در طرف مقابل، استفاده از رینگ‌های محیطی فرکانس طبیعی پوسته را با افزایش قابل توجهی مواجه می‌سازد. در واقع اثر ریب‌های محیطی بر افزایش سفتی پوسته به مراتب بیشتر از اثر آن بر افزایش وزن سازه است و به کارگیری آنها در ارتقاء رفتار ارتعاشی پوسته‌های کامپوزیتی مؤثر است.

جدول ۵- فرکانس طبیعی پوسته ساده و مشبک کامپوزیتی (هرتز)

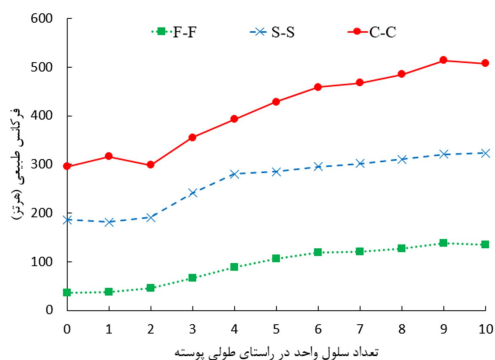
شماره مود	پوسته ساده		پوسته مشبک A		پوسته مشبک C		پوسته مشبک D	
	المان محدود	تست تجربی	المان محدود	تست تجربی	المان محدود	تست تجربی	المان محدود	تست تجربی
۱	۴۷٫۵۶۲	۵۰٫۷۸۸	۸۷٫۶۰۹	۹۵٫۲۶۶	۱۱۵٫۸۰۰	۱۱۸٫۱۱۰	۱۴۵٫۵۵۰	۱۵۵٫۳۳۵
۲	۶۴٫۶۸۳	۵۹٫۵۵۲	۱۲۰٫۰۳۰	۱۲۴٫۳۳۲	۱۳۶٫۳۸۰	۱۴۳٫۴۲۹	۱۹۳٫۶۴۰	۲۰۵٫۲۱۰
۳	۱۳۸٫۳۳۰	۱۳۸٫۳۲۹	۲۲۹٫۷۲۰	۲۴۴٫۸۹۰	۲۹۳٫۴۵۰	۲۹۲٫۱۷۹	۴۱۸٫۳۲۰	۴۳۵٫۳۲۷
۴	۱۶۹٫۲۹۰	۱۵۴٫۳۶۴	۲۳۹٫۴۰۰	۲۵۹٫۵۴۳	۳۰۱٫۱۰۰	۲۹۸٫۰۷۱	۴۲۶٫۶۹۰	۴۴۳٫۷۹۰
۵	۲۶۵٫۰۳۰	۲۵۱٫۷۵۷	۲۵۰٫۳۰۰	۲۶۴٫۳۰۰	۳۴۴٫۰۴۰	۳۶۹٫۵۱۰	۵۸۱٫۱۷۰	۶۱۶٫۱۶۵
۶	۳۰۰٫۰۱۰	۳۰۱٫۰۹۶	۳۰۴٫۴۹۰	۳۲۴٫۰۸۴	۳۶۷٫۲۴۰	۳۹۸٫۷۷۱	۶۱۰٫۵۷۰	۶۵۱٫۷۶۵

نزدیک‌تر شود، میزان اثرگذاری آنها افزایش می‌یابد. البته روند افزایشی در فرکانس طبیعی از جایی به بعد کند شده و نهایتاً متوقف خواهد شد. علت این موضوع این است که از جایی به بعد افزایش جزئی در زاویه ریب‌های مارپیچ نیازمند افزایش قابل توجهی در حجم ریب‌ها و در نتیجه افزایش وزن سازه است؛ که این موضوع اثر منفی بر فرکانس طبیعی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین فرکانس طبیعی در حالتی رخ می‌دهد که ریب‌های مارپیچ در زاویه‌ای حدود ۶۵ تا ۷۰ درجه نسبت به محور پوسته قرار گیرند.

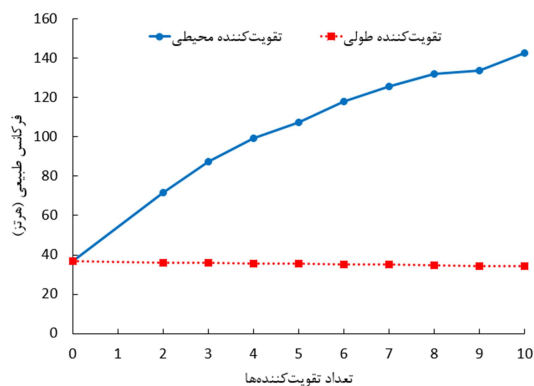
لازم به ذکر است که درصد اثرگذاری تقویت‌کننده‌ها بر فرکانس پوسته با تکیه‌گاه آزاد-آزاد به مراتب بیشتر از سایر تکیه‌گاه‌هاست. علت این است که چنین پوسته‌هایی هیچ گونه قیدی ندارند و افزودن تقویت‌کننده‌ها تقید بیشتری برای آنها (نسبت به پوسته‌هایی با شرایط مرزی دیگر) ایجاد می‌کند. این موضوع در ادامه و در بخش ۵-۴-۴- بیشتر بررسی شده است ضمن اینکه درصد اثرگذاری تقویت‌کننده‌ها بر پوسته‌هایی با تکیه‌گاه ساده- ساده و گیردار-گیردار تقریباً یکسان است. با این وجود، مطالب بیان شده برای هر سه نوع تکیه‌گاه صادق است.



شکل ۹- پوسته با شبکه‌بندی‌های مختلف
(الف) لوزی (ب) متعامد (پ) کاکوم (ت) مثلثی



شکل ۱۰- تغییرات فرکانس طبیعی به ازای افزایش پارامتر n



شکل ۸- تغییرات فرکانس طبیعی به ازای تعداد تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی

استفاده از ریب‌های مارپیچ ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد برای تقویت پوسته، شبکه‌بندی لوزی را ایجاد خواهد کرد که یکی از پرکاربردترین انواع شبکه‌بندی‌هاست. در این شبکه‌بندی، تعداد جفت ریب‌ها و زاویه آنها نسبت به محور پوسته از پارامترهای تاثیرگذار هستند که در ادامه اثر آنها بررسی خواهد شد. در مطالعه حاضر، شبکه‌بندی لوزی پایه متشکل از شش جفت ریب مارپیچ ($m=6$) در نظر گرفته شده که با زاویه $\pm 48^\circ$ نسبت به محور پوسته قرار دارند. در این حالت چهار سلول واحد در راستای طولی استوانه ایجاد می‌شود ($n=4$). شکل ۹-الف این نوع شبکه‌بندی را نمایش می‌دهد.

زاویه تقویت‌کننده‌ها با محور استوانه یکی از مهمترین پارامترهای طراحی سازه‌های مشبک هستند. ارتباط این پارامتر با تعداد جفت ریب‌های مارپیچ (m) و تعداد سلول‌های واحد در راستای طولی استوانه (n) را می‌توان طبق رابطه (۸) بیان نمود.

$$\phi = \arctan \frac{2\pi rn}{mL} \quad (8)$$

تغییر هر یک از پارامترهای m یا n موجب تغییر زاویه ریب می‌شود. بنابراین، برای بررسی اثر زاویه ریب‌ها می‌توان یکی از این پارامترها را ثابت نگه داشته و پارامتر دیگر را تغییر داد. در گام نخست، تعداد جفت ریب‌ها ثابت و برابر ۶ در نظر گرفته شده و تعداد سلول‌های واحد از ۱ تا ۱۰ تغییر داده شده است. این مسئله برای سه نوع تکیه‌گاه آزاد-آزاد (F-F)، ساده-ساده (S-S) و گیردار-گیردار (C-C) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تغییرات اولین مود فرکانسی پوسته شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در بررسی دوم، تعداد سلول‌های واحد ثابت و برابر ۴ در نظر گرفته شده است و تعداد جفت ریب‌ها از ۲ تا ۷ تغییر داده شده است و تغییرات فرکانس طبیعی پوسته به ازای تغییر تعداد جفت ریب‌های مارپیچ در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

طبق رابطه (۸)، افزایش تعداد سلول‌های واحد و یا کاهش تعداد جفت ریب‌ها (ضمن ثابت ماندن پارامتر دیگر) موجب افزایش زاویه ریب می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ریب‌ها میزان اثربخشی آنها افزایش یافته و فرکانس طبیعی پوسته بیشتر می‌شود. مطالعات پیشین نشان داد که رینگ‌های محیطی تاثیر به سزای در بهبود رفتار ارتعاشی پوسته دارند؛ در حالی که تقویت‌کننده‌های طولی چنین تاثیری ندارند. نتایج حاضر نیز موید همین نکته است؛ و هرچه نحوه قرارگیری ریب‌ها به رینگ‌های محیطی

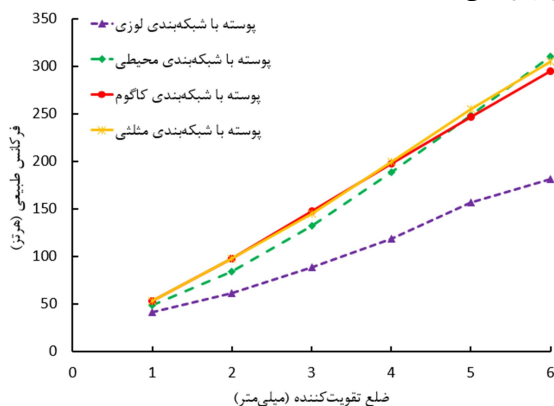
جدول ۶- فرکانس طبیعی (هرتز) چهار مود اول ارتعاشی پوسته ساده و

پوسته تقویت شده با انواع شبکه‌بندی‌های مختلف				
نوع شبکه‌بندی	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
پوسته ساده	۳۶٫۷۷	۵۰٫۰۳	۱۰۷٫۳۱	۱۳۱٫۷۶
طولی	۳۶٫۷۶	۴۷٫۳۱	۱۰۰٫۵۵	۱۲۳٫۵۲
محیطی	۱۳۱٫۹۱	۱۳۵٫۸۸	۳۸۹٫۰۲	۴۰۱٫۱۴
متعامد	۱۳۱٫۴۴	۱۳۴٫۷۷	۳۷۹٫۵۶	۳۹۱٫۲۳
لوزی	۸۸٫۲۸	۱۰۴٫۳۵	۲۳۲٫۷۹	۲۴۰٫۷۱
کاگوم	۱۴۷٫۷۶	۱۵۶٫۷۴	۴۰۷٫۱۱	۴۲۳٫۹۹
مثلثی	۱۴۴٫۷۶	۱۵۵٫۵۲	۳۸۴٫۳۱	۴۱۳٫۴۹

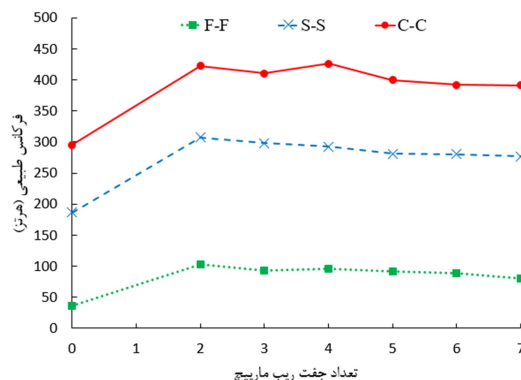
۴-۲- اثر سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها

برای بررسی اثر مساحت مقطع ریب‌ها در شبکه‌بندی‌های مختلف، سطح مقطع تقویت‌کننده به صورت مربعی فرض شده است. ضلع مربع از ۱ تا ۶ میلی‌متر تغییر داده شده و تغییرات فرکانس طبیعی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان افزایش سفتی سازه در اثر افزایش مساحت سطح مقطع ریب بیشتر از افزایش وزن آن است. بنابراین، افزایش مساحت تقویت‌کننده‌ها، رفتار ارتعاشی سازه را بهبود بخشیده و فرکانس طبیعی را تقریباً به صورت خطی افزایش می‌دهد. ضمن اینکه نتایج مربوط به شبکه تقویت‌کننده محیطی، کاگوم و مثلثی برای ابعاد مختلف مقطع تقویت‌کننده مشابه یکدیگر هستند.

نکته قابل توجه این است که رفتار ارتعاشی سازه تنها یکی از عوامل تعیین‌کننده در طراحی این سازه‌هاست. پارامترهای دیگری نظیر ظرفیت تحمل بار، ظرفیت تحمل بار ویژه و ... نیز نقشی اساسی در طراحی چنین سازه‌هایی دارند. بنابراین، لازم است که همه این موارد مورد بررسی قرار گرفته و به نتایج آنها توجه شود. به عنوان مثال، بررسی کمانش پوسته‌های مشبک نشان داده است که اگرچه با افزایش اندازه سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها، بار بحرانی مرتباً افزایش می‌یابد؛ اما بار بحرانی ویژه الزاماً روند افزایشی نخواهد داشت و از جایی به بعد با افزایش مساحت مقطع ریب بار بحرانی ویژه کاهش خواهد یافت [۱۷]. از این رو افزایش سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها همواره شرایط کلی سازه را بهبود نمی‌بخشد.



شکل ۱۲- تغییرات فرکانس طبیعی انواع پوسته مشبک کامپوزیتی به ازای اندازه‌های مختلف ضلع تقویت‌کننده



شکل ۱۱- تغییرات فرکانس طبیعی به ازای افزایش پارامتر m

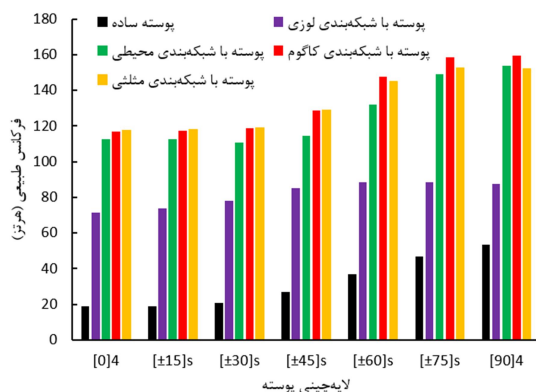
تقویت‌کننده‌های ترکیبی

شبکه تقویت‌کننده‌ها می‌تواند ترکیبی از تقویت‌کننده‌های طولی، محیطی و مارپیچ نیز باشد. شبکه‌بندی متعامد از ترکیب دو نوع تقویت‌کننده طولی و محیطی ایجاد می‌شود. در پژوهش حاضر، شبکه متعامد متشکل از هشت ریب طولی و هشت رینگ محیطی در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی کاگوم^۱ شامل ترکیب خاصی از ریب‌های مارپیچ و رینگ‌های محیطی است که ایجاد شبکه شش ضلعی می‌کند. از این رو، این شبکه‌بندی به نام شبکه‌بندی شش ضلعی یا لانه زنبوری نیز شناخته می‌شود. در این پژوهش، این نوع شبکه‌بندی با افزودن هشت رینگ محیطی به شبکه‌بندی لوزی پایه به وجود آمده است. شبکه‌بندی مثلثی^۲ نیز ترکیب دیگری از ریب‌های مارپیچ و محیطی است که در بررسی حاضر با افزودن نه تقویت‌کننده محیطی به شبکه-بندی لوزی ایجاد شده است. شکل ۹-ب تا ۹-ت شبکه‌بندی‌های لوزی، کاگوم و مثلثی را نمایش می‌دهد.

برای مقایسه بهتر اثر شبکه‌بندی‌های مختلف، فرکانس طبیعی چهار مود اول ارتعاشی پوسته ساده و پوسته‌های مشبک با انواع شبکه‌بندی‌ها در جدول ۶ آورده شده است. لازم به ذکر است که شبکه تقویت‌کننده طولی و محیطی به ترتیب از هشت تقویت‌کننده طولی و محیطی تشکیل شده است و شبکه تقویت‌کننده‌های متعامد از مجموع این دو به وجود آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، به جز تقویت‌کننده‌های طولی سایر تقویت‌کننده‌ها تأثیر مثبتی بر رفتار ارتعاشی سازه نداشته‌اند. ضمن اینکه شبکه‌بندی متعامد نیز نسبت به شبکه‌بندی محیطی ارجحیتی ندارد؛ که این موضوع بار دیگر ضعف تقویت‌کننده‌های طولی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که شبکه‌بندی لوزی نیز تأثیر قابل توجهی در افزایش فرکانس طبیعی پوسته دارد. با این وجود، چنانچه مشاهده می‌شود پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌بندی‌های کاگوم و مثلثی بیشترین فرکانس طبیعی را در میان پوسته‌های بررسی شده دارند. با توجه به تأثیر مثبت تقویت‌کننده‌های محیطی و مارپیچ قابل پیش‌بینی بود که شبکه‌بندی‌های ایجاد شده از ترکیب آنها نیز نتایج خوبی در پی داشته باشند. با توجه به نتایج حاصل شده، در ادامه به بررسی بیشتر چهار نوع شبکه‌بندی لوزی، محیطی، کاگوم و مثلثی پرداخته شده است.

^۱ Kagome grid

^۲ Triangle grid

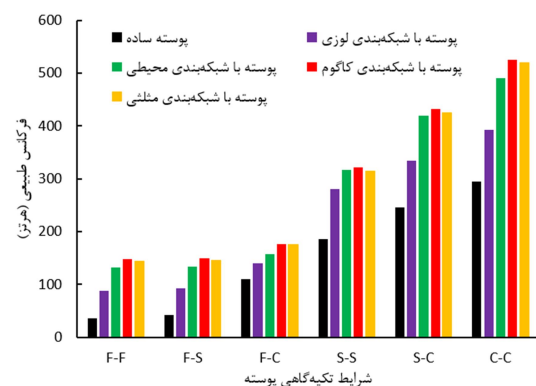


شکل ۱۴- فرکانس طبیعی پوسته ساده و مشبک با لایه چینی مختلف

۴-۴-۵- اثر شرایط تکیه‌گاهی

در بخش ۴-۲-۱- اشاره‌ای به تأثیر شرایط مرزی پوسته بر فرکانس طبیعی آن شد. در این قسمت ارتعاشات پوسته ساده و مشبک با شرایط تکیه‌گاهی مختلف بیشتر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوطه در شکل ۱۵ ترسیم شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطابق انتظار با محدودتر شدن درجات آزادی پوسته در مرزها، فرکانس طبیعی آن نیز افزایش می‌یابد. این مطلب برای پوسته‌های ساده و مشبک صادق است. نکته قابل توجه این است که هر چه شرایط مرزی پوسته مقیدتر می‌شود، میزان اثرگذاری شبکه تقویت‌کننده کاهش می‌یابد؛ که این مسئله با توجه به نحوه کارکرد تقویت‌کننده‌ها در افزایش فرکانس طبیعی قابل توجیه است. به عنوان مثال افزودن شبکه‌بندی کاگوم به پوسته ساده با تکیه‌گاه آزاد-آزاد فرکانس طبیعی آن را تا حدود سه برابر افزایش می‌دهد. این در حالی است برای تکیه‌گاه گیردار-آزاد این عدد در حدود ۶۰٪ است.

علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای شرایط تکیه‌گاهی مختلف نیز پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌بندی کاگوم و مثلثی وضعیت بهتری نسبت به سایر پوسته‌های مشبک دارند. پوسته‌های مشبک تقویت‌شده با شبکه‌بندی محیطی و لوزی نیز به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.



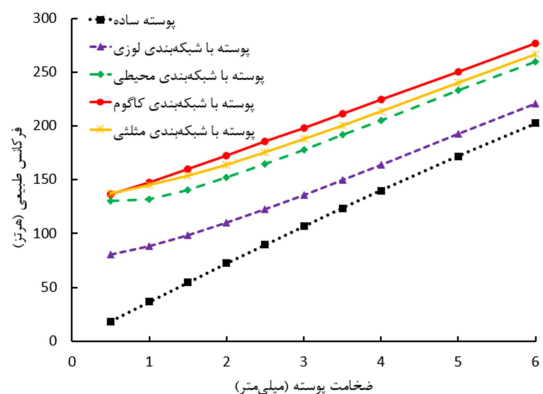
شکل ۱۵- فرکانس طبیعی پوسته ساده و مشبک با شرایط تکیه‌گاهی مختلف

۴-۴-۳- اثر ضخامت پوسته

با افزایش ضخامت پوسته، سفتی سازه و نیز وزن آن افزایش می‌یابد بنابراین نمی‌توان با قطعیت و بدون بررسی، اثر ضخامت بر رفتار ارتعاشاتی پوسته را پیش‌بینی نمود. برای مطالعه اثر ضخامت پوسته، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، ضخامت استوانه از ۰/۵ تا ۶ میلی‌متر تغییر داده شده است. تغییرات فرکانس ارتعاشی پوسته ساده و مشبک در شکل ۱۳ ترسیم شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت پوسته، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی در پوسته ساده به صورت خطی است؛ اما در پوسته‌های مشبک ابتدای نمودار غیرخطی است و در ضخامت‌های بیشتر تقریباً خطی می‌شود. ضمن اینکه با افزایش ضخامت پوسته از میزان اثرگذاری شبکه تقویت‌کننده نیز کاسته می‌شود. این مسئله به خصوص برای شبکه‌بندی لوزی مشهودتر است و پیش از این در مرجع [۱۵] نیز بدان اشاره شده بود. تشابه رفتار پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌بندی‌های محیطی، کاگوم و مثلثی نیز قابل توجه است.

۴-۴-۴- اثر لایه چینی پوسته

به منظور بررسی تأثیر نحوه چیدمان لایه‌های پوسته ساده و مشبک کامپوزیتی، هفت لایه چینی متقاطع^۱ مختلف مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن شکل ۱۴ نمایش داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که برای انواع لایه‌چینی‌های مختلف پوسته‌های مشبک فرکانس بالاتری نسبت به پوسته ساده دارند. ضمن اینکه وضعیت پوسته تقویت‌شده با شبکه‌بندی محیطی، کاگوم و مثلثی تقریباً مشابه، و بهتر از پوسته با شبکه‌بندی لوزی است. علاوه بر این، بررسی نتایج روشن می‌سازد که با افزایش زاویه قرارگیری الیاف نسبت به محور استوانه، که منجر به افزایش سفتی پوسته در راستای محیطی می‌شود؛ فرکانس طبیعی پوسته بطور مرتب افزایش یافته است. به نحوی که بیشترین فرکانس طبیعی برای پوسته‌هایی حاصل شده است که الیاف آن کاملاً به صورت محیطی پیچیده شده است. این موضوع برای پوسته ساده و انواع پوسته‌های مشبک صادق است.



شکل ۱۳- تغییرات فرکانس طبیعی پوسته ساده و مشبک کامپوزیتی برای ضخامت‌های مختلف پوسته

^۱ Angle ply

۵- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی پارامترهای موثر بر ارتعاشات پوسته ساده و مشبک کامپوزیتی انجام شده است. این مهم با انجام مطالعات تجربی و عددی حاصل شده است. بدین منظور، نمونه‌هایی از پوسته ساده و مشبک ساخته شده و با انجام تست آنالیز مودال، فرکانس طبیعی آنها تعیین شده است. همچنین بر اساس تست‌های استاندارد مختلف، خواص مکانیکی پوسته و ریب تعیین شده است. از این خواص برای تهیه مدل المان محدود استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این مدل به کمک نتایج تجربی و نیز سایر نتایج عددی، تجربی و تحلیلی موجود در مقالات اعتبارسنجی شده است. در نهایت اثر پارامترهای مختلف بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های ساده و مشبک به کمک همین مدل مطالعه شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن ریب‌های تقویت‌کننده الزاماً فرکانس طبیعی سازه را افزایش نمی‌دهد. در میان انواع تقویت‌کننده‌های ساده، رینگ‌های محیطی موثرتر از سایرین هستند. هرچند شبکه بندی لوزی که از ریب‌های مارپیچ ایجاد می‌شود نیز تاثیر قابل قبولی در افزایش فرکانس طبیعی پوسته دارد. ترکیب رینگ‌های محیطی با ریب‌های مارپیچ و تشکیل شبکه‌بندی‌های کاگوم و مثلثی نیز در بهبود رفتار ارتعاشی پوسته موثر است. البته به طور کلی تقویت پوسته با شبکه‌بندی محیطی، کاگوم و مثلثی وضعیت تقریباً مشابهی ایجاد می‌نماید و پوسته با شبکه‌بندی لوزی در جایگاه بعدی قرار دارد. با توجه به اختلاف نه چندان زیاد نتایج پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌بندی محیطی و پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌بندی‌های کاگوم و مثلثی، می‌توان ادعا نمود که از نقطه نظر ارتعاشاتی استفاده از تقویت‌کننده‌های محیطی به تنهایی می‌تواند خواسته‌های طراحی را ارضا نماید و نیازی به استفاده از شبکه‌بندی‌های پیچیده‌تر نیست.

موارد بیان شده برای ضخامت‌ها و لایه‌چینی‌های مختلف پوسته، انواع شرایط مرزی گوناگون و نیز ابعاد مختلف سطح مختلف ریب‌ها صادق است. علاوه بر این، بررسی‌ها نشان داد که افزایش اندازه سطح مقطع تقویت‌کننده‌ها همواره رفتار ارتعاشی را بهبود می‌بخشد؛ هرچند این امر ممکن است بر سایر موارد طراحی مانند وزن و ظرفیت ویژه تحمل بار تاثیر منفی داشته باشد. همچنین، با افزایش ضخامت پوسته، فرکانس طبیعی پوسته‌های ساده و مشبک افزایش می‌یابد. ضمن اینکه، در پوسته‌های ضخیم‌تر میزان اثرگذاری شبکه تقویت‌کننده کمتر است. بررسی لایه‌چینی‌های مختلف پوسته نشان می‌دهد که هر چه زاویه قرارگیری الیاف نسبت به محور استوانه افزایش یابد، فرکانس طبیعی آن نیز بیشتر خواهد شد. مطالعه پوسته‌های ساده و مشبک با تکیه‌گاه‌های مختلف نیز روشن ساخت که با مقیدتر شدن شرایط مرزی پوسته از درصد اثرگذاری شبکه تقویت‌کننده کاسته خواهد شد؛ هر چند همچنان میزان افزایش فرکانس طبیعی پوسته مشبک نسبت به پوسته ساده قابل توجه است.

۶- مراجع

- [1] Haftchenari H., Darvizeh M., Darvizeh A., Ansari R., and Sharma C., Dynamic analysis of composite cylindrical shells using differential quadrature method (DQM), *Composite Structures*, Vol. 78, No. 2, pp. 292-298, 2007.

- [2] Amabili M., and Reddy J., A new non-linear higher-order shear deformation theory for large-amplitude vibrations of laminated doubly curved shells, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 45, No. 4, pp. 409-418, 2010.
- [3] Amabili M., Nonlinear vibrations of laminated circular cylindrical shells: comparison of different shell theories, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 1, pp. 207-220, 2011.
- [4] Qu Y., Hua H., and Meng G., A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries, *Composite Structures*, Vol. 95, pp. 307-321, 2013.
- [5] Jin G., Ye T., Ma X., Chen Y., Su Z., and Xie X., A unified approach for the vibration analysis of moderately thick composite laminated cylindrical shells with arbitrary boundary conditions, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 75, pp. 357-376, 2013.
- [6] Hoppmann W. H., Some characteristics of the flexural vibrations of orthogonally stiffened cylindrical shells, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 30, No. 1, pp. 77-82, 1958.
- [7] Prokopenko N. Y., Intrinsic oscillations of a reinforced laminar cylindrical shell, *International Applied Mechanics*, Vol. 15, No. 9, pp. 821-827, 1979.
- [8] Bert C. W., Kim C.-D., and Birman V., Vibration of composite-material cylindrical shells with ring and/or stringer stiffeners, *Composite Structures*, Vol. 25, No. 1-4, pp. 477-484, 1993.
- [9] Zhao X., Liew K., and Ng T., Vibrations of rotating cross-ply laminated circular cylindrical shells with stringer and ring stiffeners, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, No. 2, pp. 529-545, 2002.
- [10] Hemmatnezhad M., and Rahimi H., Free vibration analysis of grid stiffened composite cylindrical shells, *World Journal of Engineering*, pp. 421-422.
- [11] Jam J., Yusef Zadeh M., Taghavian H., and Eftari B., Vibration Analysis of Grid-Stiffened Circular Cylindrical Shells with Full Free Edges, *Polish Maritime Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 23-27, 2011.
- [12] Li Z.-M., and Qiao P., Nonlinear vibration analysis of geodesically-stiffened laminated composite cylindrical shells in an elastic medium, *Composite Structures*, Vol. 111, pp. 473-487, 2014.
- [13] Rahimi G., Hemmatnezhad M., and Ansari R., Prediction of vibrational behavior of grid-stiffened cylindrical shells, *Advances in Acoustics and Vibration*, Vol. 2014, 2014.
- [14] Hemmatnezhad M., Rahimi G., and Ansari R., On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells, *Acta Mechanica*, Vol. 225, No. 2, pp. 609, 2014.
- [15] Hemmatnezhad M., Rahimi G., Tajik M., and Pellicano F., Experimental, numerical and analytical investigation of free vibrational behavior of GFRP-stiffened composite cylindrical shells, *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 509-518, 2015.
- [16] Gibson R. F., *Principles of composite material mechanics*: CRC press, 2011.

[۱۷] طالع‌زاده لاری ع.، تحلیل نظری و تجربی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی دارای گشودگی، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۶.