

تحلیل اثر هندسی شبکه بر پاسخ مودال سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی به روش تجربی و عددی

محمد رضا زمانی^۱، سید محمد رضا خلیلی^۲

۱ دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، a_mrzamani@mut.ac.ir

۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۵

چکیده

در این مقاله، اثر هندسه شبکه بر پاسخ آنالیز مودال در سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی مطالعه شده است. سازه استوانه‌ای مورد مطالعه دارای دو نوع شبکه شش‌ضلعی و مثلثی است که از کامپوزیت کربن / اپوکسی ساخته شده است. برای رسیدن به سازه‌ای با دقت ابعادی بالا، سازه با استفاده از نوعی قالب منعطف بسیار دقیق به روش رشته‌پیچی ساخته شده و پس از پایان فرایند پیچش و تثبیت پیکره کلی آن، در داخل کوره پخت شده است. در ادامه رفتار ارتعاشی سازه با انجام آنالیز مودال تجربی به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای مختلف آن در شرایط تکیه‌گاهی آزاد-آزاد مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین با استفاده از روش المان محدود رفتار ارتعاشی سازه برای شرایط تکیه‌گاهی فوق بررسی و نتایج آن با نتایج آنالیز مودال تجربی مقایسه شده است. نتایج تحلیل‌های فوق نشان می‌دهند سازه با شبکه مثلثی در شرایط تکیه‌گاهی مختلف فرکانس‌های طبیعی بالاتری نسبت به سازه با شبکه شش‌ضلعی دارد. در ادامه، اثر انواع دیگر شرایط تکیه‌گاهی (گیردار - آزاد و گیردار - گیردار) نیز به روش المان محدود بر ارتعاشات آزاد سازه و تأثیر آنها بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مطالعه شده است. مقایسه نتایج تحلیل عددی و آنالیز مودال تجربی، گویای هماهنگی و نزدیک بودن مقادیر نتایج حاصل از آنها و همچنین تصدیق بر کارآمد بودن روش تحلیل المان محدود به کار رفته در این پژوهش می‌باشد.

واژگان کلیدی

استوانه مشبک کامپوزیتی، آنالیز مودال، ارتعاشات آزاد، المان محدود

۱. مقدمه

سازه‌ها در شرایط کاربردی است که تحلیل‌های دینامیکی، استاتیکی از جمله آنهاست. ویژگی سفتی و استحکام ویژه بالای

توسعه فناوری سازه‌های مشبک کامپوزیتی به‌منزله ساختارهای مستحکم و سبک برای کاربردهای هوافضایی، مستلزم تحلیل این

مواد کامپوزیتی از مشخصه‌های اساسی رویکرد به این مواد در طراحی سازه‌های هوافضایی است که سازه‌های مشبک کامپوزیتی با برخورداری از این ویژگی‌ها به‌منزله ساختارهایی کارآمد در این خصوص برای تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی به‌شمار می‌آیند. این سازه‌ها متشکل از ریب‌های مارپیچ و محیطی با چیدمان‌های متنوعی است که تشکیل شبکه‌های یکپارچه با الگوهای مختلف می‌دهند؛ همچنین در برخی از کاربردهای خاص یک یا دو پوسته خارجی یا داخلی طی فرایند ساخت ایجاد و شبکه ریب‌ها را احاطه می‌کنند. نقش اصلی در تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی در این‌گونه سازه‌ها برعهده شبکه ریب‌هاست، به‌همین علت بازدهی سازه‌هایی با این ساختار در مقایسه با دیگر سازه‌ها به‌مراتب بیشتر است. تحلیل آنالیز مودال به‌منظور یافتن مشخصات و خواص ذاتی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب دمپینگ و شکل مودها دینامیکی آنها بسیار حائز اهمیت است.

تحقیقات بسیاری در زمینه‌های بالا صورت گرفته است. جیانگ (۱۹۹۴) با استفاده از روش عددی، تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای با تقویت‌کننده‌های متعامد را مورد مطالعه قرار داد [۱]. این تکنیک در قالب یک روش المان محدود ویژه توسعه داده شد. همچنین وی با این روش توانست زمان لازم برای همگرایی پاسخ‌ها را کاهش دهد. چاکراورتی و همکاران [۲-۳] به‌شیوه تحلیل اجزای محدود، ارتعاشات آزاد پوسته کامپوزیتی لایه‌ای با دو انحنای تعمیر یافته را با استفاده از المان‌های محدود ایزوپارامتریک چهارضلعی منحنی هشت‌گره‌ای بررسی نموده‌اند. در این پژوهش، تغییر شکل برشی مرتبه اول برای پوسته‌های کم عمق و نازک در نظر گرفته شده است. لاکشمینارایانا (۱۹۹۲) ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای دایروی با استفاده از روش اجزای محدود را مورد مطالعه قرار دادند [۴]. در پژوهش مورد نظر، اثر ناهمسانگردی بر فرکانس‌های مربوط به مودهای مختلف و نمایش شکل مودهای مختلف بررسی شده‌اند. همت‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴) تحلیل یکپارچه رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده مشبک با ریب‌های موجی را مورد مطالعه قرار دادند [۵]. آنها در بررسی‌های خود از روش آغشته‌سازی برای افزودن اثر سفتی تقویت‌کننده‌ها به سفتی کل پوسته و تعیین پارامتر سفتی معادل بهره برده‌اند. اگل (۱۹۶۸) تحلیل ارتعاشات آزاد یک پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده با رینگ و

استرینگر برای شرایط مرزی مختلف را مطالعه کردند [۶]. از نتایج مورد توجه این تحقیق بررسی حضور رینگ و استرینگر و اثر آن بر نتایج ارتعاشی است که نتایج نشان داد نقش آنها در تحمل بارهای زیاد و رفتار دینامیکی سازه بسیار مؤثر بوده است. جعفری و باقری (۲۰۰۶) ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای با تقویت‌کننده‌های محیطی، مانند رینگ‌های با تقویت‌کننده‌های غیریکنواخت گریز از مرکز و فاصله‌های تقویت‌کننده نابرابر را تحلیل نمودند [۷]. این مطالعه با استفاده از روش‌های تئوری، تجربی و اجزای محدود انجام شده است. در حل به‌روش ریتز تقویت‌کننده‌ها به‌عنوان اجزای گسسته در نظر گرفته شده‌اند. نتایج فرکانس‌های طبیعی برای پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده با شرایط تکیه‌گاهی ساده و فاصله برابر رینگ‌ها با دیگر نتایج تئوری و تجربی مقایسه شده‌اند که توافق خوبی بین آنها مشاهده می‌شود.

واسیلیو (۲۰۰۶) طراحی، ساخت و تحلیل سازه‌های مشبک کامپوزیتی مورد کاربرد در صنایع هوافضا را بررسی کرد و نتیجه آن بود که راندمان وزنی این سازه‌ها به‌مراتب بیشتر از سازه‌های مشابه با تقویت‌کننده‌های غیرکامپوزیتی است [۸]. یزدانی و رحیمی (۲۰۱۰) به‌روش تجربی آثار تغییرات شکل شبکه و تعداد ریب‌های تقویت‌کننده مارپیچ، بر باربری پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده تمام‌کامپوزیتی را بررسی نموده‌اند [۹]. نتایج نشان داد که برای استفاده بهینه از پوسته‌های تقویت‌شده به حداقل مقداری از چگالی شبکه نیاز است و در بارگذاری محوری، پوسته‌های تقویت‌شده با شبکه‌های لوزی شکل بهترین عملکرد را دارند.

در تحقیق هایپرچتر (۲۰۰۲) برای پیش‌بینی رفتار سازه‌های مشبک، با ارائه مدلی از تغییر شکل سازه مشبک در فضای شکست از کدهای کامپیوتری استفاده شده است [۱۰]. همچنین بررسی پارامتریک روی انواع سازه‌های مشبک و هندسه‌ها انجام شده است.

در این پژوهش، تحلیل عددی و تجربی آنالیز مودال سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی روی پاسخ‌های فرکانسی و شکل مودهای سازه انجام شده است. مواد سازه مذکور کامپوزیت متشکل از کربن / اپوکسی است که به‌روش رشته‌پیچی ساخته شده است. همچنین نتایج حاصل از آنالیز مودال تجربی با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه شده‌اند. در نهایت سازه مذکور در شرایط مختلف استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

تا آخرین شیار ماریچ ادامه می‌یابد. مرحله دوم رشته‌پیچی، که همان تکرار کد کامپیوتری است، اجرا می‌شود؛ به طوری که ابتدا الیاف به داخل شیارهای محیطی و سپس ماریچ هدایت می‌شوند. گفتنی است تمامی مراحل رشته‌پیچی الیاف داخل شیارها در این پژوهش به صورت بی‌وقفه و پیوسته انجام شده است. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا ضخامت ریبها به مقدار مطلوب طراحی شده برسند (شکل ۲).



شکل ۲. فرایند رشته‌پیچی و ساخت نمونه

پس از پایان مراحل پیچش، مجموعه قطعه و مندرل در حداقل مدت زمان لازم (که در طراحی تعیین شده) تحت چرخش آزاد قرار می‌گیرد تا ساختار شبکه تثبیت شود. در مرحله بعد قطعه به همراه مندرل داخل کوره قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که قطعه در هنگام پخت باید حول محور طولی خود چرخش داشته باشد تا رزین از داخل شیار خارج نشود و نیز یکنواختی و تقارن پخت و انتقال حرارت در محیط قطعه میسر گردد. پس از کامل شدن سیکل پخت، قطعه از داخل مندرل به بیرون کشیده می‌شود. خواص مکانیکی ساختارهای مشبک متأثر از پارامترهای هندسی می‌باشند که در شکل ۳ معرفی شده‌اند. همچنین در جدول ۱ پارامترهای هندسی سازه و شبکه آن در نمونه‌های ساخته شده ارائه شده است.

۳. طراحی مدل و شبیه‌سازی

تحلیل ارتعاشی سازه کامپوزیتی مورد نظر، به کمک نرم‌افزار آباکوس نسخه ۱۲-۶ انجام شده است. مدل هندسی جسم به صورت سه‌بعدی ایجاد شده است. با توجه به آنکه ضخامت سازه نسبت به سایر ابعاد آن بسیار کوچک است، مدل ایجاد شده به صورت پوسته‌ای و تغییرشکل پذیر در نظر گرفته شده است. در

در پژوهش حاضر ایجاد مدل قابل اعتماد عددی برای تحلیل دینامیکی سازه کاربردی طراحی و ساخته شده مد نظر بوده است. مرور پیشینه‌های بررسی شده حاکی از آن است که در زمینه آنالیز مودال سازه‌های مشبک با ساختارهای هندسی مختلف شبکه تحلیل جامعی صورت نگرفته است. لذا در این مقاله به صورت جامع به این تحلیل پرداخته شده است.

۲. فرایند ساخت نمونه‌ها

۲-۱. تهیه قالب

در فرایند رشته‌پیچی برای ساخت قطعات به یک مندرل^۱ نیاز است که پیچش الیاف روی آن انجام گیرد. در این پژوهش با رویکرد افزایش کیفیت ساخت نمونه‌ها و همچنین کاهش هزینه‌ها از یک قالب منعطف شیاردار استفاده شده است. قالب منعطف شیاردار برای شکل‌دهی هندسه شبکه مورد نظر طراحی و ساخته شده که نمایی از دو نوع قالب با شبکه هندسی مختلف آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. قالب‌های منعطف شیاردار برای دو نوع شبکه شش‌ضلعی و مثلثی

۲-۲. رشته‌پیچی و ساخت نمونه‌ها

ساخت نمونه‌های استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با دستگاه رشته‌پیچی چندین مرحله دارد. اولین مرحله آماده‌سازی حمام رزین می‌باشد. چون دمای رزین در حین فرایند رشته‌پیچی، از جمله پارامترهای مؤثر در افزایش استحکام سازه است، باید این پارامتر کنترل شود. همچنین یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در این فرایند، کشش الیاف در حین فرایند است که تأثیر بسزایی بر استحکام مکانیکی سازه دارد و این پارامتر نیز باید کنترل شود. به منظور انجام فرایند و هدایت الیاف آغشته‌شده به رزین در شیارهای حلقوی و ماریچ قالب، از برنامه کامپیوتری استفاده شده است تا هدایت دقیق الیاف آغشته‌شده به رزین در داخل شیارها و در نهایت کیفیت بالای ساخت قطعات حاصل شود. در ابتدا یک لایه الیاف آغشته به رزین در داخل شیارهای محیطی مندرل پیچیده می‌شود، سپس پیچش الیاف در داخل شیارهای ماریچی شروع و

۴. آنالیز مودال

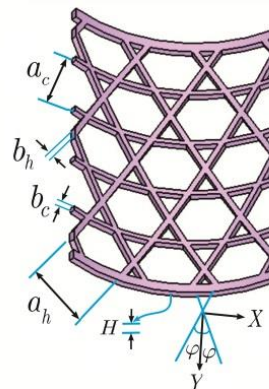
از جمله تست‌های مهم برای حصول اطمینان از صحت ساخت و کارکرد قطعات برای کاربردهای دینامیکی، تست مودال آنهاست. در این پژوهش، هدف از انجام تست مودال تعیین رفتار و مشخصات دینامیکی دو نوع سازه مشبک کامپوزیتی با شبکه‌های مختلف هندسی (شش‌ضلعی و مثلثی) بدون رویه است. پارامترهای دینامیکی در این تست شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای مربوطه و میزان ضریب میرایی می‌باشند. انجام تست مودال روی هر قطعه مکانیکی متفاوت و تابع شرایط مختلفی است که مهم‌ترین آنها به‌طور کلی شرایط نصب و بهره‌برداری و هندسه جسم است. در پژوهش حاضر، با توجه به کم‌بودن جرم سازه، آزمایش مودال با اعمال ضربه توسط چکش انجام شده است. همچنین برای نزدیک‌شدن به شرایط تکیه‌گاهی آزاد، نمونه سازه مورد آزمایش در حالت آویخته تحت آزمون مودال قرار گرفته است (شکل ۴). برای یافتن شکل مدهای سازه، نکته مهم تعیین موقعیت نصب شتاب‌سنج‌هاست، که این موقعیت‌ها براساس پیش‌بینی شکل مدها از تحلیل المان محدود تشخیص داده شده‌اند. همچنین شتاب‌سنج‌ها باید نسبت به محور استوانه متقارن نصب گردند. به همین ترتیب مطابق تعداد گره‌ها یک مدل‌سازی فیزیکی در نرم‌افزار انجام می‌شود. کد شناسایی و شماره خروجی پورت دیتالاگر برای هر حسگر، که روی نمونه نصب شده است، در محیط نرم‌افزار در گره مربوطه تعریف می‌شود. نحوه انجام آزمایش این است که در ۹۶ گره ضربه وارد شده و خروجی ثبت شده و در نرم‌افزار N-Modal تحلیل می‌شوند. الگوریتم انتخابی آنالیز مودال داده‌ها، روش فضای فرکانسی چندمرجعی برای سیستم‌های چندرودی - چندخروجی است. مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها، تحلیل سازه‌هایی است که دارای مدهای نزدیک به هم یا مدهای تکراری هستند؛ به‌طوری‌که با استفاده از این روش بهترین نتایج برای تعیین مشخصات مودال سازه، شامل فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مدها حاصل می‌شود.

۵. نتایج و بحث

۵-۱. نتایج تحلیل المان محدود

در ابتدا اثر المان‌بندی بر همگرایی مقادیر فرکانس‌های ارتعاشی در مدهای اول تا پنجم بررسی می‌شود. برای این منظور تحلیل‌های متعددی با افزایش تعداد المان‌ها از ۴۲۲۰ تا ۱۵۲۶۰

این پژوهش، همان‌گونه که بیان شد، در ساخت سازه از الیاف پیوسته تک‌جهته آغشته به رزین به‌روش رشته‌پیچی استفاده شده است. به‌همین دلیل در این شبیه‌سازی الیاف تک‌جهته، با مشخصات فیزیکی و مکانیکی ارائه‌شده در جدول ۲، به‌همراه جهت‌گیری آنها در سازه، برای مدل تعریف شده است. در این پژوهش خواص مکانیکی و فیزیکی اعمال‌شده در تحلیل‌های عددی (جدول ۲)، از طریق آزمون کشش استاندارد تعیین خواص ماده کامپوزیتی (ASTM-D2343) استخراج شده است. نمونه استاندارد مورد استفاده در آزمون فوق از مواد اصلی به‌کار رفته در سازه ساخته شد. همچنین شرایط تکیه‌گاهی مختلفی برای سازه در تحلیل در نظر گرفته شده است. برای مش‌بندی سازه نیز از المان‌های S4R (المان‌های پوسته‌ای چهارگوش مرتبه یک) استفاده شده است.



شکل ۳. پارامترهای هندسی شبکه سازه

جدول ۱. مشخصات هندسی سازه و شبکه آن

شش‌ضلعی و مثلثی	شکل شبکه
۳۰۰	ارتفاع سازه (میلی‌متر)
۱۵۰	شعاع سازه (میلی‌متر)
۵۶/۷۳	فاصله ریب‌های هلیکال ^۲ (میلی‌متر)
۶۰	فاصله ریب‌های حلقوی ^۳ (میلی‌متر)
۵×۴	مساحت سطح مقطع ریب‌ها (میلی‌متر مربع)
۱۵	تعداد ریب‌های ماریچ (جفت)
۲۸	زاویه ریب‌های ماریچ (درجه)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های

ساخته‌شده سازه براساس انجام آزمون استاندارد کشش

خواص الاستیک مواد در ناحیه ریب‌ها				
ρ (kg/m^3)	E_{11} (Gpa)	E_{22} (Gpa)	ν_{12}	G_{12} (Gpa)
۱۶۰۰	۱۰۰	۸	۰/۳۱	۴/۶

فرکانس‌های طبیعی سازه برای هر دو نوع شبکه شش‌ضلعی و مثلثی، در مودهای اول تا پنجم در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فرکانس‌های طبیعی سازه با شبکه مثلثی بیشتر از فرکانس‌های سازه با شبکه شش‌ضلعی است. به طوری که فرکانس‌های طبیعی سازه با شبکه مثلثی در مودهای اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم به ترتیب $۲/۹$ ، $۲/۹$ ، ۱ ، $۱/۱$ و $۲/۷$ درصد بیشتر از فرکانس‌های طبیعی سازه با شبکه شش‌ضلعی است. با توجه به اینکه مقادیر جرم‌های دو نوع سازه بسیار نزدیک به هم می‌باشد، علت این امر را می‌توان ناشی از سفتی بیشتر شبکه مثلثی نسبت به شبکه شش‌ضلعی دانست.

انجام شد. با افزایش تعداد المان‌ها نتایج همگرا می‌شوند، اما زمان حل مسئله به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. لذا در اینجا از تعداد ۱۰۳۰۵ المان به عنوان مناسب‌ترین تعداد المان (برای رسیدن به کمترین مدت زمان حل مسئله با دقت مناسب) استفاده شده است. پس از انجام تحلیل ارتعاشی در نرم‌افزار المان محدود، مقادیر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر محاسبه شده‌اند. در شکل ۵، شکل مودهای به دست آمده برای سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی برای هر دو شبکه نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نوع و هندسه شبکه سازه تأثیری در شکل مودهای سازه ندارد. همچنین مقادیر



شکل ۴. انجام آنالیز مودال تجربی روی سازه

شماره مود	شبکه شش‌ضلعی	نتایج تجربی هر دو شبکه	شبکه مثلثی
۱			
۲			
۳			
۴			
۵			

شکل ۵. شکل مودهای ارتعاشی حاصل از نتایج المان محدود و آنالیز مودال تجربی برای دو نوع شبکه هندسی شش‌ضلعی و مثلثی

۲-۵. نتایج آنالیز مودال تجربی

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش آنالیز مودال تجربی انجام می‌شود. همان‌طور که بیان شد، اعمال تحریک اولیه سازه توسط چکش^۴ مخصوص صورت گرفته است. نرم‌افزار آنالیز مودال مورد استفاده برای تعیین توابع پاسخ فرکانسی^۵، تابع مودال کل سازه را با استفاده از توابع پاسخ فرکانسی تمام نقاط ایجاد نموده است. سپس نمودارهای حاصل با استفاده از الگوریتم برازش منحنی در فضای فرکانسی چندمرجعی تحلیل شده و در نهایت ویژگی‌های مودال سازه به‌دست آمده است. مقادیر فرکانس‌های طبیعی برای سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی با هر دو نوع شبکه شش‌ضلعی و مثلثی، در موده‌های اول تا پنجم در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج حاکی است سازه مشبک با شبکه مثلثی مقادیر فرکانس‌های بیشتری نسبت به سازه با شبکه شش‌ضلعی دارد. به‌طوری‌که نتایج آنالیز مودال تجربی روی سازه نشان می‌دهد فرکانس‌های طبیعی سازه در موده‌های اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم سازه به‌ترتیب ۰/۷، ۱/۴، ۱/۹، ۲/۶ و ۰/۷ درصد بیشتر است. همچنین اختلاف میان فرکانس‌های طبیعی به‌دست آمده از نرم‌افزار المان محدود و آنالیز مودال تجربی در موده‌های اول تا پنجم در جدول ۳ آمده است. بیشترین اختلاف بین نتایج حاصل از آنالیز مودال تجربی و نتایج المان محدود در محاسبه فرکانس طبیعی سازه، در مود پنجم و برابر ۱۱/۱۹ است و کمترین اختلاف نیز برای فرکانس طبیعی چهارم سازه و برابر ۶/۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۳. فرکانس‌های حاصل از نتایج تحلیل المان محدود و آنالیز مودال تجربی

شماره مود	نوع تحلیل	فرکانس طبیعی سازه با شبکه شش‌ضلعی (هرتز)	فرکانس طبیعی سازه با شبکه مثلثی (هرتز)	اثر شبکه در فرکانس طبیعی سازه
اول	عددی	۱۲۷/۶۶	۱۳۱/۴	+٪ ۲/۹
	تجربی	۱۴۰/۲۴	۱۴۱/۳	+٪ ۰/۷
	اختلاف	-٪ ۸/۹	-٪ ۷	-
دوم	عددی	۱۲۷/۶۶	۱۳۱/۴	+٪ ۲/۹
	تجربی	۱۴۳/۶۷	۱۴۵/۸	+٪ ۱/۴
	اختلاف	-٪ ۱۱/۱۱	-٪ ۹/۸	-
سوم	عددی	۱۶۱/۱۷	۱۶۳/۰۸	+٪ ۱/۱
	تجربی	۱۷۲/۶	۱۷۵/۹	+٪ ۱/۹
	اختلاف	-٪ ۶/۶	-٪ ۷/۶	-
چهارم	عددی	۱۶۱/۱۷	۱۶۳/۰۹	+٪ ۱/۱
	تجربی	۱۷۶/۵	۱۸۱/۱	+٪ ۲/۶
	اختلاف	-٪ ۸/۷	-٪ ۱۰/۱	-
پنجم	عددی	۳۵۸/۸۸	۳۶۸/۷۶	+٪ ۲/۷
	تجربی	۴۰۴/۱۱	۴۰۷/۲	+٪ ۰/۷
	اختلاف	-٪ ۱۱/۱۹	-٪ ۱۰/۸	-

۳-۵. اثر شرایط تکیه‌گاهی بر پاسخ ارتعاشی سازه

بنا به محدودیت‌های عملی انجام آنالیز مودال تجربی برای انواع شرایط تکیه‌گاهی و به‌منظور توسعه و تکمیل این پژوهش، با توجه به نتایج مثبت اعتبارسنجی تحلیل المان محدود انجام‌شده توسط آزمون‌های تجربی، در این بخش تحلیل مودال ساب‌ر شرایط تکیه‌گاهی مبتنی بر روش عددی انجام شده است. در شکل ۶ شکل موده‌های مختلف سازه در شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد و گیردار - گیردار - آزاد آمده است. شکل موده‌های سازه در شرایط

تکیه‌گاهی مختلف کاملاً متفاوت است، اما هندسه شبکه هیچ‌گونه اثری بر این تفاوت‌ها ندارد. در جدول ۴، فرکانس طبیعی سازه با شبکه شش‌ضلعی و مثلثی در شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد و گیردار - گیردار در آنالیز تجربی ارائه شده است. به‌طور کلی فرکانس‌های طبیعی سازه در شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار بیشتر از سایر شرایط تکیه‌گاهی می‌باشد. همچنین اثر هندسه شبکه بر فرکانس‌های طبیعی سازه به‌ترتیب در شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد، گیردار - گیردار و آزاد - آزاد بیشتر است.

جدول ۴. فرکانس طبیعی سازه با شبکه‌های شش ضلعی و مثلثی در شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد و گیردار - گیردار در تحلیل المان محدود

شمارهٔ مود	شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد		شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار	
	شبکهٔ مثلثی	شبکهٔ شش ضلعی	شبکهٔ مثلثی	شبکهٔ مثلثی
اول	۱۰۷۱/۱	۴۵۷/۰۷	۱۰۷۴/۸	۴۷۶/۸۶
دوم	۱۰۷۱/۹	۴۵۷/۰۸	۱۰۷۴/۹	۴۷۶/۸۹
سوم	۱۱۴۱/۵	۵۲۷/۵۷	۱۱۹۷/۹	۵۴۲/۹۵
چهارم	۱۱۴۲	۵۲۸	۱۱۹۸	۵۴۳/۰۵
پنجم	۱۲۰۴/۵	۷۰۹/۱	۱۲۰۷/۰۵	۷۳۰/۷۸

شکل مود	شرایط تکیه‌گاهی گیردار - گیردار		شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد	
	شبکهٔ مثلثی	شبکهٔ شش ضلعی	شبکهٔ مثلثی	شبکهٔ شش ضلعی
اول				
دوم				
سوم				
چهارم				
پنجم				

شکل ۶. شکل مودهای ارتعاشی حاصل از تحلیل عددی برای شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد و گیردار - گیردار

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل مودال استوانه‌های مشبک کامپوزیتی با دو هندسه شبکه شش‌ضلعی و مثلثی به روش تجربی و عددی برای شرایط مرزی مختلف بررسی شد. ایجاد مدل پیشگو و قابل اعتماد عددی و روش مدلسازی و تحلیل مودال عددی و صحنه‌گذاری آن با انجام تحلیل مودال تجربی برای سازه با هندسه خاص مورد تحقیق از دستاوردهای این پژوهش است. نتایج نشان داده‌اند که هندسه شبکه سازه استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی بر مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه تأثیرگذار هستند. به طوری که نتایج آنالیز مودال تجربی و تحلیل عددی بر روی سازه استوانه‌ای مشبک نشان داد که مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه با هندسه شبکه مثلثی بالاتر از مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه با هندسه شبکه شش‌ضلعی است که این نتیجه ناشی از سفتی بیشتر شبکه مثلثی نسبت به شبکه شش‌ضلعی است. از طرفی شکل مودهای سازه در شرایط تکیه‌گاهی مختلف کاملاً متفاوت می‌باشد، اما هندسه شبکه هیچ‌گونه اثری در این تفاوت ندارد. همچنین اثر هندسه شبکه بر فرکانس‌های طبیعی سازه به ترتیب در شرایط تکیه‌گاهی گیردار-آزاد، گیردار-گیردار و آزاد-آزاد بیشتر است. این نتیجه را می‌توان ناشی از تأثیر شرایط مرزی بر خواص و پارامترهای مؤثر در تحلیل مودال به‌ویژه بر سفتی سازه نسبت داد؛ به طوری که متناسب با افزایش سفتی سازه ناشی از هر یک از شرایط مرزی،

فرکانس طبیعی سازه نیز افزایش یافته و این نتیجه در هر دو روش تحلیل تجربی و عددی ارائه شده در جداول مربوط کاملاً مشهود است. نتایج نشان داده‌اند که ایجاد مدل و شبیه‌سازی عددی سازه از دقت بالایی برخوردار بوده و از آن می‌توان به‌عنوان یک راه‌کار عملی و کم‌هزینه در تحلیل آنالیز مودال سازه‌های مشبک کامپوزیتی بهره‌برداری کرد. تطابق و هماهنگی خوب نتایج تحلیل‌های مودال تجربی و عددی علاوه بر تصدیق مدلسازی مناسب و دقیق عددی، به‌صورت متقابل انتخاب روش مناسب ساخت و دقت در طراحی و ساخت نمونه‌های تجربی و همچنین پیاده‌سازی آزمون‌های تجربی استاندارد را صحنه می‌گذارد. اگرچه می‌توان برای مدلسازی عددی از روش‌هایی چون Wire-frame، Beam یا Solid استفاده نمود. اما این روش‌ها فاقد دقت مطلوب بوده و زمان حل آنها بسیار طولانی است. از اینرو در این بررسی از روش تحلیل عددی مبتنی بر المان Shell در نرم‌افزار Abaqus استفاده شده است. در تحقیق حاضر که از دو جنبه تحلیل عددی و تجربی (با ساخت و تست نمونه‌های متعدد و متنوعی) صورت گرفته است، برخلاف انتظار و پیش‌بینی سایر پژوهش‌ها، وجود پوسته یکپارچه روی شبکه ریب‌ها سهم بسزایی در افزایش استحکام و چگونگی رفتار دینامیکی سازه داشته است که نتایج این تحقیق در مقالات دیگر محقق ارائه شده است.

۷. مأخذ

- [1] J. Jiang, M. Olson, Vibration analysis of orthogonally stiffened cylindrical shells using super finite elements, *Journal of sound and vibration*, vol. 173, 1994, pp. 73-83.
- [2] D. Chakravorty, J. Bandyopadhyay, P. Sinha, Free vibration analysis of point-supported laminated composite doubly curved shells-A finite element approach, *Computers & structures*, vol. 54, 1995, pp. 191-198.
- [3] D. Chakravorty, J. Bandyopadhyay, P. Sinha, Finite element free vibration analysis of doubly curved laminated composite shells, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 191, 1996, pp. 491-504.
- [4] H. Lakshminarayana, K. Dwarakanath, Free vibration characteristics of cylindrical shells made of composite materials, *Journal of sound and vibration*, vol. 154, 1992, pp. 431-439.
- [5] M. Hemmatnezhad, G. Rahimi, R. Ansari, On the free vibrations of grid-stiffened composite cylindrical shells, *Acta Mechanica*, vol. 225, 2014, pp. 609-623.
- [6] D. Egle, J. Sewall, An analysis of free vibration of orthogonally stiffened cylindrical shells with stiffeners treated as discrete elements, *AIAA Journal*, vol. 6, 1968, pp. 518-526.
- [7] A. Jafari, M. Bagheri, Free Vibration of Rotating Ring Stiffened Cylindrical Shells with Non-Uniform Stiffener Distribution, *J Sound Vib*, vol. 296, 2006, pp. 353-376.
- [8] V. V Vasiliev, A. F. Razin, Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft

applications, *Composite Structure*, vol. 76, no. 1, 2006, pp. 182–189.

[9] M. Yazdani, G. H. Rahimi, The effects of helical ribs' number and grid types on the buckling of thin-walled GFRP-stiffened shells under axial

loading, *J. Reinf. Plast. Compos*, vol. 29, no. 17, 2010, pp. 2568–2575.

[10] S. M. Huybrechts, et al., Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, 2002, pp. 155-161.

پی نوشت

-
1. mandrel
 2. helical
 3. hoop
 4. hammer
 5. frequency response function (FRF)