ISAV2024
چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران

بررسی ارتعاشات آزاد ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی قابل بازیافت با ساختارهای متفاوت لایه میانی

سید علی موسوی[آ]، حسن شکراللهی[ب*]

[آ] ایران، تهران، خ طالقانی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

[ب] ایران، تهران، خ طالقانی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *hshokrollahi@khu.ac.ir*

چکیده

این مقاله به تحلیل ارتعاشات ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی قابل بازیافت می‌پردازد. هدف این تحقیق بررسی مودهای ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی این سازه‌ها با استفاده از تحلیل عددی است. رویه‌های سازه از جنس کامپوزیت ساخته شده با الیاف شیشه و رزین پلی‌آمید است و هسته آن از جنس پلی‌آمید ساخته شده است که پلیمری گرمانرم است و قابلیت بازیافت و استفاده مجدد را دارد. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به بهبود طراحی و کاربردهای صنعتی این سازه در حوزه‌های مختلف مانند هوافضا، خودروسازی، قایق‌های تندرو و ... کمک کند. تحلیل ارتعاشات این ساندویچ پنل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا به بهبود پایداری و بهبود عملکرد دینامیکی آنها منجر می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در سازه با ساختار هسته لانه زنبوری، با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد و میانگین فرکانس‌های طبیعی در سازه با ساختار لانه زنبوری ۶ درصد بیشتر از ساختار آگزتیک سینوسی است. سازه‌های آگزتیک سینوسی وزن بیشتر و فرکانس طبیعی پایین‌تری بطور میانگین در مقایسه با ساختار لانه زنبوری دارد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت دیواره سلول، فرکانس طبیعی سازه افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، فرکانس طبیعی مود اول در سازه با هسته لانه زنبوری و ضخامت دیواره ۱/۵ میلی‌متر، حدود ۹۵۲/۳۶ هرتز است، در حالی که برای سازه‌ای با ضخامت دیواره ۲/۵ میلی‌متر، این مقدار به ۹۷۰/۹۱ هرتز افزایش یافته است. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه ضخامت دیواره و نوع ساختار هسته بر رفتار دینامیکی پنل‌های ساندویچی است.

کلمات کلیدی: ساندویچ‌پنل کامپوزیتی؛ مودهای ارتعاشی ؛ فرکانس طبیعی؛ ساختار آگزتیک.

۱- مقدمه

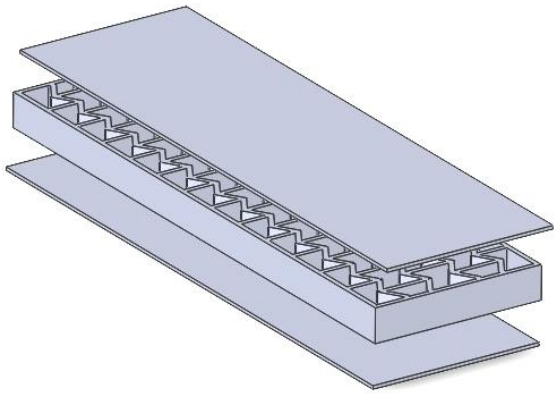
ساندویچ‌پنل‌های کامپوزیتی به سبب خواص فیزیکی و مکانیکی خاصی که دارند مورد توجه صنایع هوا فضا، خودروسازی، ساختمان سازی و بسیاری از صنایع دیگر قرارگرفته اند. این سازه‌ها عموماً سبک وزن هستند و از مقاومت خمشی بالایی نسبت به وزن خود برخوردار هستند. رویه‌های این سازه‌ها وظیفه تحمل بارهای خمشی، ایجاد صلبیت و محافظت از هسته را بر عهده دارند و هسته نیز با تحمل بارهای برشی، کاهش وزن سازه و در مواردی با توجه به کاربرد، عایق حرارتی و صوتی، نقش اساسی ایفا می‌کند. ترکیب رویه‌ها و هسته موجب بهبود عملکرد مکانیکی و کاهش وزن کلی سازه می‌شود. رویه‌های سازه مورد بررسی با روش پرس گرم و با استفاده از ورق‌نازک پلی آمید و الیاف شیشه ساخته شده است. هسته سازه از ورق پلی‌آمید با ضخامت ۸ میلی‌متر ساخته شده که به وسیله دستگاه CNC برش خورده و به ساختارهای لانه زنبوری و آگزتیک تبدیل شده است. امروزه ساختارهای آگزتیک به سبب خواص منحصر به فردی که در برابر بارهای کششی از خود نشان می‌دهند دارای اهمیت زیادی در صنایع شده‌اند و استفاده از آنها در مواردی که سازه تحت کشش و ازدیاد طول قرار می‌گیرد حائز اهمیت است. محققین بسیاری در زمینه‌های مختلف به بررسی ارتعاشات این سازه‌ها پرداخته‌اند. در پژوهشی که توسط قلی‌زاده و همکاران [۱] انجام شده است به بررسی تجربی و عددی ویژگی‌های ارتعاشی یک پنل ساندویچی کامپوزیتی با هسته مشبک پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش قالب‌گیری رزین با کمک خلاء در ساخت این سازه باعث دستیابی به لایه‌های بدون حفره و بهبود ویژگی‌های ارتعاشی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پنل‌های ساندویچی ساخته شده با هسته مشبک دارای فرکانس‌های طبیعی بالاتر و نسبت میرایی کمتر هستند که نشان‌دهنده پایداری دینامیکی بهتر و عملکرد ارتعاشی بهینه‌تر این سازه‌ها است. همچنین، نتایج تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند که روش‌های تحلیلی به کار رفته در این پژوهش با دقت بالایی ویژگی‌های ارتعاشی پنل‌ها را پیش‌بینی می‌کنند. در مطالعه دیگری وانگ و همکاران [۲] به بررسی ویژگی‌های ارتعاشی سازه با هسته لانه زنبوری کامپوزیتی پرداخته‌اند. مدلی معادل برای هسته لانه زنبوری کامپوزیتی ارائه شده و با استفاده از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی اجزای محدود و تست‌های مودال، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای این پنل‌ها پیش‌بینی شدند. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های معادل می‌توانند با دقت بالایی ویژگی‌های ارتعاشی پنل‌های ساندویچی را پیش‌بینی کنند. همچنین، پنل‌های بازطراحی شده با هسته لانه زنبوری عرضی برای مقایسه با پنل‌های دارای هسته لانه زنبوری مربعی ساخته شدند و نتایج نشان دادند که هسته‌های لانه زنبوری دارای ویژگی‌های ارتعاشی بهتری هستند. در پژوهشی که توسط ایسای و همکاران [۳] انجام شده است، تحلیل تجربی و عددی ویژگی‌های لرزه‌ای سازه‌های ساندویچی ساخته شده از موادی با پایه طبیعی با هسته آگزتیک مورد بررسی قرار گرفته است. برای ساخت این سازه‌ها از پرینت سه‌بعدی با استفاده از پلی‌لاکتیک‌اسید تقویت‌شده با الیاف کتان استفاده شده است. آزمایش‌های لرزش در پیکربندی‌های مختلف و با چگالی‌های متفاوت هسته‌های آگزتیک انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از هسته آگزتیک در سازه‌های ساندویچی باعث افزایش فرکانس‌های طبیعی و کاهش ضریب میرایی می‌شود. همچنین، این پژوهش نشان داد که خواص دینامیکی سازه‌های ساندویچی با هسته آگزتیک به دلیل بهبود خصوصیات میرایی و سفتی دینامیکی بهینه‌تر می‌شود. هوو و همکاران [۴] در پژوهشی به بررسی ارتعاش آزاد و پاسخ دینامیکی صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته آگزتیک پرداخته‌اند. این تحقیق بر تحلیل ویژگی‌های ارتعاشی و پاسخ دینامیکی صفحات ساندویچی که دارای هسته‌ای با ضریب پواسون منفی هستند، تمرکز دارد. از مدل اجزای محدود هموار مبتنی بر تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول برای تحلیل استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مواد آگزتیک رفتارهای متفاوتی نسبت به مواد معمولی دارند و این رفتارها تحت تاثیر ساختار داخلی ماده آگزتیک قرار می‌گیرند. پارامترهای هندسی، خواص مواد و شرایط مرزی تاثیر زیادی بر ویژگی‌های ارتعاشی و پاسخ دینامیکی صفحات ساندویچی آگزتیک دارند. در پژوهشی که توسط اروین و همکاران [۵] انجام شده است، به بررسی عددی ارتعاش آزاد و اجباری تیر ساندویچی کامپوزیتی با هسته ویسکوالاستیک پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از نظریه مرتبه بالا برای تیرهای ساندویچی با ورق‌های کامپوزیتی و هسته ویسکوالاستیک، با در نظر گرفتن جابجایی‌های مستقل عرضی در دو ورق و تغییرات خطی در عمق هسته، می‌تواند به دقت بالاتری در پیش‌بینی رفتار ارتعاشی منجر شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده می‌توانند با دقت بالایی رفتار ارتعاش آزاد و اجباری تیرهای ساندویچی را پیش‌بینی کنند. همچنین، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله خواص ویسکوالاستیک هسته و نسبت طول به ارتفاع تیر بر فرکانس‌های طبیعی و پاسخ ارتعاش اجباری مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی که توسط چو و همکاران[۶] انجام شده است، ویژگی‌های ارتعاشی تیرهای

ساندویچی با هسته مشبک و رویه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه از روش تحلیل اجزاء محدود برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار ارتعاشی تیرها استفاده کرده است. نتایج نشان می‌دهد که تیرهای ساندویچی با هسته مشبک دارای فرکانس‌های طبیعی بالاتری نسبت به تیرهای ساندویچی با هسته‌های معمولی هستند. همچنین، مشاهده شده است که استفاده از هسته مشبک منجر به افزایش پایداری دینامیکی و بهبود عملکرد ارتعاشی سازه‌ها می‌شود. پژوهش دیگری که توسط امبالزانو و همکاران[۷] انجام شده است، به بررسی عددی پنل‌های مرکب آگزتیکی تحت بارگذاری انفجاری پرداخته شده است. پنل‌های ساندویچی با هسته‌های سلولی آگزتیکی و دیواره‌های فلزی برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت بیشتری در بارهای انفجاری دارند پیشنهاد شده است. در پژوهش دیگری که توسط مظفری و همکاران[۸] صورت گرفت ، به مطالعه عددی تحلیل ارتعاشی ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری و از جنس فوم پلی یورتان پرداخته شده است ، خواص مکانیکی فوم پلی یورتان به طور تجربی بدست آورده شده و با نرم افزار آباکوس تحلیل عددی انجام شده است ، فرکانس های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی با هسته های مختلف بررسی شد، نتایج نشان دهنده این موضوع بود که پر کردن هسته با فرم پلی یورتان باعث بهبود خواص مکانیکی شده و تاثیر مثبتی بر نتایج تحلیل ارتعاشی داشته است. در پژوهشی دیگر، نگوِین و همکاران [۹] به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی و ارتعاشی صفحات ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های لانه زنبوری آگزتیک پرداخته‌اند. این صفحات دارای خاصیت ضریب پواسون منفی هستند که باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری‌های شدید مانند انفجار و بارهای مکانیکی می‌شود. در این تحقیق، ابتدا مدل ریاضی مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی این سازه‌ها توسعه داده شده و سپس با استفاده از روش‌های عددی، تاثیرات مختلفی همچون ضخامت هسته، ویژگی‌های آگزتیک، و شرایط مرزی بر روی پاسخ دینامیکی و فرکانس‌های طبیعی سازه بررسی شده است. مشاهده شد که برای ساختارهای با ضخامت هسته بیشتر، فرکانس‌های طبیعی تا ۳۰٪ افزایش یافتند. همچنین، هسته‌های آگزتیک به کاهش جابجایی‌های ناشی از بارگذاری دینامیکی کمک کردند، به‌طوری که در برخی از نمونه‌ها کاهش جابجایی تا ۲۵٪ مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهند که ساختارهای ساندویچی با هسته‌های آگزتیک می‌توانند در کاربردهایی که نیاز به پایداری دینامیکی بالا دارند، به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرند. در مقاله‌ای که توسط صیاد و یوواراج [۱۰] انجام شده است، آن‌ها به بررسی و تحلیل ارتعاشات آزاد در صفحات ساندویچی با لایه‌های کامپوزیتی پرداخته‌اند. روش‌های مختلف تحلیلی و عددی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی این سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که استفاده از نظریه‌های تغییر شکل برشی مرتبه بالا (HSDTs) دقت بالاتری در پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی نسبت به نظریه‌های تغییر شکل برشی مرتبه پایین (LSDTs) دارند. همچنین، افزایش ضخامت لایه‌ها و خواص مواد تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار ارتعاشی سازه دارد. به عنوان نمونه، برای یک صفحه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، فرکانس طبیعی اول حدود ۱۵۰ هرتز به دست آمد، در حالی که برای یک صفحه با ضخامت ۲۰ میلی‌متر، این مقدار به حدود ۲۱۰ هرتز افزایش یافت. این افزایش فرکانس به علت افزایش سختی خمشی سازه با افزایش ضخامت صفحات است.

هدف از این پژوهش، انجام تحلیل ارتعاشی سازه‌های ساندویچی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس است. در این تحقیق، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی سازه‌های ساندویچی با ساختارها و ضخامت‌های متفاوت دیواره سلول‌های هسته بررسی و مقایسه خواهند شد. با مقایسه این نتایج، تاثیر ساختار و ضخامت دیواره سلول‌ها بر ویژگی‌های ارتعاشی سازه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا به بهبود طراحی و عملکرد این نوع سازه‌ها کمک کند. معرفی سازه ساندویچی مورد استفاده در این پژوهش و کاربردهای آنها به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد. نحوه مدل‌سازی سازه‌ها با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک و تحلیل عددی با نرم افزار آباکوس شرح داده خواهد شد و در انتها نتایج تحلیل‌های ارتعاشی ارائه و بررسی می‌شود.

۲- ساختار ساندویچ پنل‌ها و روش تحلیل

تحلیل ارتعاشی جهت محاسبه فرکانس‌های طبیعی و نمایش مودهای ارتعاشی روی نمونه کامپوزیتی انجام شده است. شماتیک نمونه مورد آزمون در شکل (۱) آورده شده است. مدلسازی انجام شده معادل سازه ساندویچی ساخته شده با رویه کامپوزیتی با رزین پلی‌آمید و الیاف شیشه صورت گرفته است. کامپوزیت مورد استفاده در رویه‌ها با تراکم الیاف در حدود ۴۰درصد هستند و از الیاف بافته شده با تراکم gr/m^2 ۳۰۰ استفاده شده است.



شکل ۱. شماتیک سازه ساندویچی مدلسازی شده

در جدول (۱) نتایج مربوط به تست کشش رویه کامپوزیتی، که با استفاده از تست تجربی استخراج شده است، ارائه شده است که از مقادیر بدست آمده در شبیه سازی عددی با نرم افزار آباکوس استفاده شده است.

جدول ۱. مدول الاستیک رویه کامپوزیتی

شماره نمونه	مدول الاستیک (MPa)
نمونه ۱	۱۴۶۰۸/۲۹
نمونه ۲	۱۶۲۱۲/۶۷
نمونه ۳	۱۵۸۱۸/۴۳

همچنین بر اساس نتایج تست‌های کشش انجام شده، مدول الاستیک پلی‌آمید که به عنوان هسته در سازه ساندویچی استفاده شده است، برابر با ۲۸۵۸/۵۸ مگاپاسکال محاسبه شده است.

چگالی نمونه کامپوزیتی نیز برابر kg/m^3 ۱۲۰۹/۳۷ محاسبه شده است و ضرایب پوآسون برای پلی آمید و نمونه کامپوزیتی نیز برابر ۰/۳ محاسبه شده است. لازم به ذکر است در تحلیل‌های عددی صورت گرفته ، لایه کامپوزیتی متصل به ساندویچ‌پنل به صورت ایزوتروپیک مدل‌سازی شده است که با توجه به ضخامت کم در برابر ضخامت کل سازه، نوع تحلیل و نوع کامپوزیت و جهت‌گیری الیاف در آن، خطا ناشی از این ساده سازی به حداقل می‌رسد و در این پژوهش نیز هدف مقایسه بین نمونه‌ها نسبت به تغییر در ضخامت دیواره سلول و تفاوت در نوع سلول در هسته سازه‌ها است. از هسته با ساختار لانه‌زنبوری و ساختار آگزیتک سینوسی در این پژوهش استفاده شده است.

از مهمترین موارد در تحلیل‌های عددی شرایط مرزی مسئله است. شرایط مرزی مختلف پاسخ‌متفاوتی در حوزه فرکانسی خواهد داد و عموماً شرایط مرزی با در نظرگرفتن کاربرد یک سازه تعیین می‌گردد. در این آزمون شرایط مرزی دو سر مفصل[1]مورد بررسی

[1] Pinned

قرارگرفته است. طبیعی است با توجه به مفاهیم ارتعاشی فرکانس طبیعی با شرط مرزی دو سر گیردار بالاتر از شرط مرزی دو سر مفصل باشد و برای دیگر شرایط مرزی می‌توان تا حدودی کمتر یا بیشتر بودن فرکانس‌های طبیعی را حدس زد. تیرها با شرط مرزی یک سر گیردار فرکانس طبیعی پایین تر و مودهای ارتعاشی پیچیده‌تری خواهند داشت.

سازه در این پژوهش با استفاده از المان تو پر سه بعدی[2] مدل شده است که نسبت به مدل های دو بعدی و المان تیر از دقت بالاتری برخوردار است. سایز المان‌ها در تحلیل با توجه با آنالیز حساسیت مش انتخاب شده است. برای اتصال رویه‌ها و هسته در نرم افزار آباکوس از قید tie استفاده شده است که این قید تمام درجات آزادی گره های متناظر را با هم کوپل میکند.

۳- حل عددی و نتایج

به منظور بررسی دقت و صحت نتایج به‌دست آمده، ابتدا به اعتبارسنجی تحلیل عددی پرداخته می‌شود و برای این منظور نتایج شبیه‌سازی عددی با مرجع [۱۱] مقایسه شده است. در این مقاله، تحلیل‌های انجام شده در راستای تحلیل‌های همین پژوهش بوده است و بنجدوو و همکاران به بررسی ارتعاشی ساندویچ‌پنل‌های کامپوزیتی مورد استفاده در قطعات هواپیما و فضاپیماها پرداخته‌اند. جدول (۲) نشان‌دهنده مقادیر فرکانس طبیعی بدست آمده از تحلیل عددی و اختلاف آن با تحلیل پژوهش مرجع است.

جدول ۲. فرکانس طبیعی سازه لانه زنبوری و آگزتیک

	مود اول طولی	مود دوم طولی	مود اول پیچشی	مود اول عرضی
مقادیر مرجع [۱۱] (هرتز)	۳۰۰	۹۸۸	۱۱۱۰	۲۳۱۴
مقادیر تحلیل حاضر (هرتز)	۳۰۸/۳	۸۵۹/۴	۱۲۲۱/۵	۲۳۰۰/۰
اختلاف (درصد)	۲/۷	۱۳/۰	۹/۰	۰/۶

همانطور که در جدول (۲) آورده شده، مقادیر اختلاف اندکی با مقادیر مرجع دارند که نشان دهنده دقت درست بودن فرآیند انجام شده در تحلیل عددی است. اختلاف جزئی در مقادیر می‌تواند به علت استفاده از نوع المان‌های متفاوت، نوع حلگر، تعداد المان‌ها و روش‌های مش زنی متفاوت باشد.

در سازه‌ها بسته به کاربرد آنها نیاز به بررسی مودهای ارتعاشی مختلفی از جمله مودهای طولی، عرضی و پیچشی است. در این پژوهش بیشتر به مودهای ارتعاشی در راستای طول پرداخته شده است و همچنین ضرایب مربوط به دمپینگ و میرایی درنظر گرفته نشده است و تمامی تحلیل ها در ناحیه خطی الاستیک انجام شده است. از اثرات گرانش و بارهای هیدرواستاتیکی که تاثیر مستقیم روی فرکانس طبیعی سازه‌ها دارند نیز صرف نظر شده است.

با توجه به مقادیر فرکانس‌های طبیعی آورده شده در جدول (۳)، میانگین فرکانس‌های طبیعی در سازه با ساختار لانه زنبوری ۶ درصد بیشتر از ساختار آگزتیک سینوسی است. به صورت کلی، با افزایش وزن، فرکانس طبیعی سازه کاهش می یابد اما با توجه به مقادیر جدول (۳) می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اینکه سازه‌های آگزتیک وزن بیشتر و فرکانس طبیعی کمتری دارند، اما با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها تغییرات فرکانس طبیعی در ساختار آگزتیک در حدود ۱ درصد و برای ساختار لانه زنبوری در حدود ۲درصد است. این موضوع نشان‌دهنده بیشتر بودن سرعت تغییرات فرکانس طبیعی ساختار لانه‌زنبوری با افزایش ضخامت دیواره سلول، نسبت به ساختار آگزتیک سینوسی است. در مقایسه فرکانس‌های طبیعی یک سازه با ساختار یکسان و ضخامت دیواره سلول متفاوت، با توجه به اینکه با افزایش ضخامت دیواره، وزن سازه بیشتر شده، اما فرکانس طبیعی نیز بیشتر می‌شود که علت آن افزایش سفتی سازه با ضخامت دیواره سلول بشتر است. با توجه به جدول (۳) ، با افزایش ضخامت دیواره سلول، فرکانس طبیعی مودهای اول و دوم طولی و

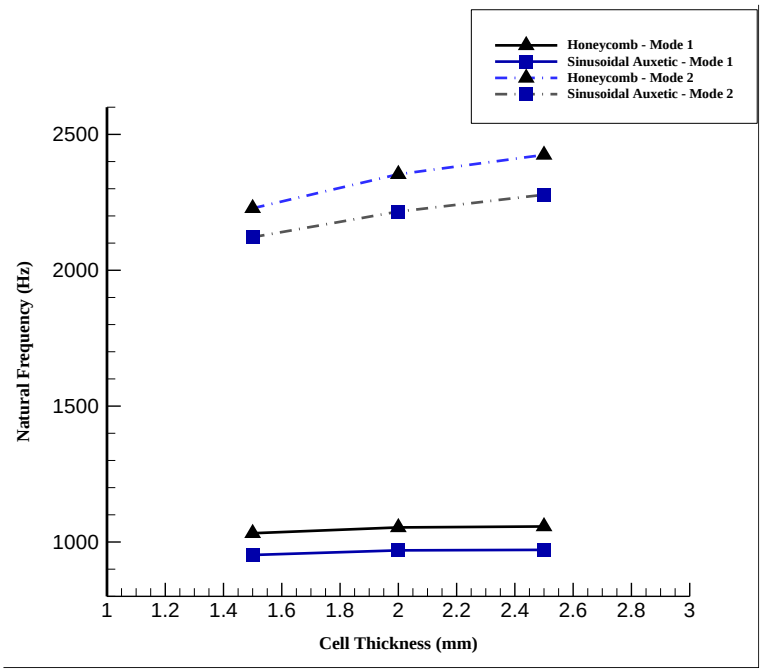
[2] 3D Solid Element

مود اول پیچشی افزایش می‌یابد اما فرکانس طبیعی مود اول عرضی، با افزایش ضخامت دیواره سلول کاهش می‌یابد. این مورد در شکل (۲) نیز تصریح شده است.

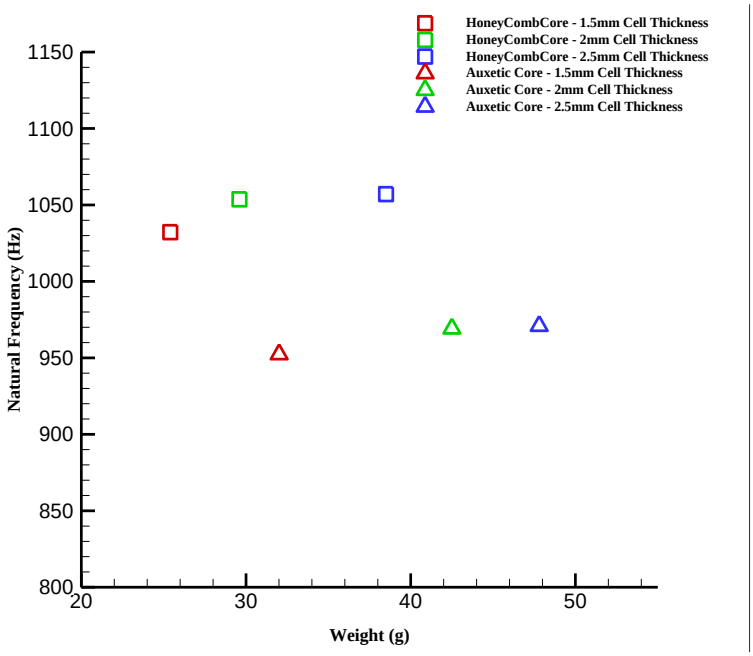
جدول ۳. فرکانس طبیعی سازه لانه زنبوری و آگزتیک

	آگزتیک سینوسی			لانه زنبوری		
	(ضخامت ۱/۵م.م)	(ضخامت ۲م.م)	(ضخامت ۲/۵م.م)	(ضخامت ۱/۵م.م)	(ضخامت ۲م.م)	(ضخامت ۲/۵م.م)
مود اول طولی	۹۵۲/۴	۹۶۹/۲	۹۷۰/۹	۱۰۳۲/۲	۱۰۵۳/۷	۱۰۵۷/۱
مود دوم طولی	۲۱۲۱/۶	۲۲۱۶/۱	۲۲۷۸/۰	۲۲۲۸/۲	۲۳۵۳/۴	۲۴۲۴/۵
مود اول عرضی	۲۸۰۵/۳	۲۷۱۱/۰	۲۶۷۸/۸	۳۰۳۶/۹	۲۹۴۹/۶	۲۸۹۱/۸
مود اول پیچشی	۱۸۲۰/۹	۱۸۲۴/۴	۱۸۳۴/۱	۱۹۲۳	۱۹۴۱	۱۹۵۳/۸

یکی از مهمترین نکات در سازه‌های ساندویچی وزن سازه است. در ادامه به مقایسه وزن سازه‌ها در کنار فرکانس طبیعی برای مود اول طولی پرداخته شده است. تغییرات وزن‌ها با توجه به فرکانس طبیعی و ضخامت دیواره سلول‌ها در شکل (۳) نمایش داده شده است. این نمودار نشان دهنده بیشتر بودن میانگین وزن سازه‌های آگزتیک سینوسی نسبت به ساختار لانه زنبوری است، درحالی که سازه‌های آگزتیک میانگین فرکانس طبیعی پایین‌تری نسبت به سازه‌ها با ساختار لانه زنبوری دارند.

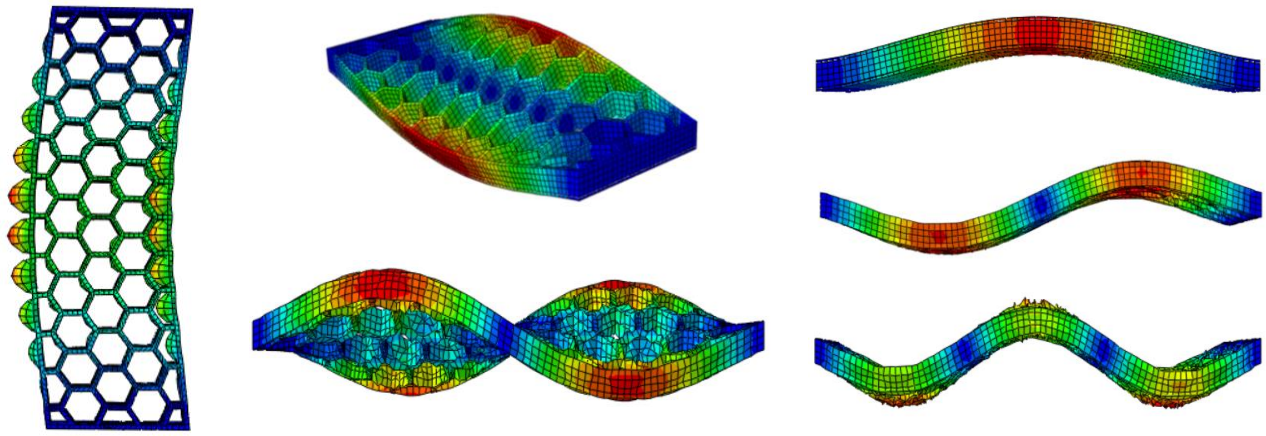


شکل ۲. فرکانس طبیعی مودهای ۱ و ۲ طولی برای ضخامت مختلف دیواره سلول‌ها



شکل ۳. پراکندگی فرکانس طبیعی سازه‌های مختلف با تغییرات وزن و ضخامت دیواره سلول‌های هسته

در شکل (۴) مودهای ارتعاشی طولی، عرضی و پیچشی نمایش داده شده است. هر مود با فرکانس خاص خود ظاهر شده و نشان‌دهنده نحوه تغییر شکل سازه تحت تاثیر ارتعاشات است. تمامی مودها مطابق با انتظارات و رفتارهای استاندارد ارتعاشی هستند و مقادیر فرکانس طبیعی با توجه به وزن، ضخامت دیواره سلول‌ها و نوع سلول‌ها دچار تغییر می‌شود.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۴. شکل مودهای ارتعاشی برای مود اول تا سوم طولی (الف)، مود اول و دوم پیچشی (ب) و مود اول عرضی (ج)

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار ارتعاشی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های مختلف و رویه‌هایی از جنس الیاف شیشه و رزین پلی‌آمید بررسی شد. مدل‌سازی‌ها نشان دادند که ساختار هسته و ضخامت دیواره‌های آن نقش مؤثری در فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی پنل‌ها دارد. رفتار ارتعاشی پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی با استفاده از تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که نوع ساختار هسته و ضخامت دیواره سلول‌ها به طور قابل توجهی بر فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی سازه‌ها تأثیر می‌گذارند. در ساختار لانه زنبوری، با افزایش ضخامت دیواره سلول، فرکانس طبیعی افزایش یافته و این موضوع منجر به بهبود پایداری دینامیکی سازه می‌شود. در مقابل، سازه‌هایی با هسته‌های آگزتیک، علی‌رغم افزایش وزن، همچنان فرکانس‌های طبیعی بالاتری را نشان می‌دهند که نشان از عملکرد بهتر آن‌ها در مواجهه با بارهای دینامیکی دارد. همچنین، بررسی‌ها نشان داد که با افزایش ضخامت دیواره‌ها در هر دو ساختار، فرکانس طبیعی مودهای طولی و عرضی افزایش یافته و پایداری دینامیکی سازه بهبود می‌یابد. با توجه به این نتایج، استفاده از سازه‌های ساندویچی با هسته‌های آگزتیک و لانه زنبوری می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به مقاومت بالا در برابر ارتعاشات دارند، به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه همچنین می‌تواند به بهبود طراحی‌های مهندسی و افزایش کارایی سازه‌های ساندویچی در صنایع مختلف کمک کند.

مراجع

[1] M. Gholizadeh Eratbeni, Y. Rostamiyan, and S. M. Seyyedi, “An experimental and numerical study on the vibration characteristics of glass fiber composite sandwich panel with lattice cores,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 236, no. 8, pp. 1604–1613, 2022, doi: 10.1177/14644207221075895.

[2] I. M. Daniel, E. E. Gdoutos, K. A. Wang, and J. L. Abot, “Failure modes of composite sandwich beams,” *Int. J. Damage Mech.*, vol. 11, no. 4, pp. 309–334, 2002, doi: 10.1106/105678902027247.

[3] K. Essassi, J. L. Rebiere, A. E. L. Mahi, M. A. Ben Souf, A. Bouguecha, and M. Haddar, “Experimental and numerical analysis of the dynamic behavior of a bio-based sandwich with an auxetic core,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1058–1077, 2021, doi: 10.1177/1099636219851547.

[4] T. H. Quoc, T. M. Tu, and V. Van Tham, “Free vibration and dynamic response of sandwich composite plates with auxetic honeycomb core,” *J. Sci. Technol. Civ. Eng. - HUCE*, vol. 15, no. 4, pp. 1–14, 2021, doi: 10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(4)-01.

[5] H. Arvin, M. Sadighi, and A. R. Ohadi, “A numerical study of free and forced vibration of composite sandwich beam with viscoelastic core,” *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 4, pp. 996–1008, 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.09.047.

[6] H. K. Cho and J. Rhee, “Vibration in a satellite structure with a laminate composite hybrid sandwich panel,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 10, pp. 2566–2574, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.04.019.

[7] G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, and P. V. S. Lee, “A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings,” *Compos. Struct.*, vol. 135, pp. 339–352, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.09.038.

[8] H. Mozafari and S. Najafian, “Vibration analysis of foam filled honeycomb sandwich panel–numerical study,” *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 191–198, 2019, doi: 10.1080/14484846.2017.1338325.

[9] D. D. Nguyen and C. H. Pham, “Nonlinear dynamic response and vibration of sandwich composite plates with negative Poisson’s ratio in auxetic honeycombs,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 20, no. 6, pp. 692–717, 2018, doi: 10.1177/1099636216674729.

[10] A. S. Sayyad and Y. M. Ghugal, “On the free vibration analysis of laminated composite and sandwich plates: A review of recent literature with some numerical results,” *Compos. Struct.*, vol. 129, pp. 177–201, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.04.007.

[11] A. Benjeddou and M. Guerich, “Free vibration of actual aircraft and spacecraft hexagonal honeycomb sandwich panels: A practical detailed FE approach,” *Adv. Aircr. Spacecr. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 169–187, 2019, doi: 10.12989/aas.2019.6.2.169.