



Semnan University



Research Article

Vibration Analysis of Sandwich Panel Structures: A Homogenized Simulation Approach with Modal Analysis

Amir Reza Mousavi ^a, Amir Hossein Kazemian ^{b,*}

^a Master Student of Mechanical Engineer, University of Sistan And Baluchestan, Zahedan, Iran

^b Assistant professor, Faculty Member of Mechanical Engineering, University of Sistan And Baluchestan, Zahedan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 05 February 2024

Revised: 08 March 2024

Accepted: 16 March 2024

Keywords:

Sandwich panel,
Honeycomb structure,
Corrugation structure,
Modal analysis,
Finite elements method,
Natural frequency.

ABSTRACT

Sandwich panels with diverse core materials and different types and materials are extensively employed in the industry and hold significant potential for improvement. This study focuses on a specific sandwich panel configuration consisting of aluminum face sheets and a polylactic acid (PLA) core with a honeycomb corrugated geometry. The design of this panel was accomplished and its behavior was simulated using CATIA software. The vibration characteristics of the panel were subsequently analyzed utilizing Abaqus software. Two simulation modes were employed: a fully identical simulation and a homogenized simulation. In the homogenized simulation, the honeycomb core composed of PLA with isotropic properties was replaced by an equivalently represented flat plate possessing orthotropic properties. To validate the accuracy of the software simulation, experimental modal testing was conducted on a physical sample. The obtained modal test results were subjected to analysis using N-modal analysis software and then compared with the analytical simulation results. Furthermore, the simulation results were compared with and without considering the adhesive connections, revealing minimal influence of the adhesive connections (less than 1.1%) on mode shapes and natural frequencies.

The simulation results and modal analysis indicate an error coefficient of less than 7%. The presented homogenization technique can be effectively employed to streamline the simulation process, reduce time requirements, and simplify the complexity of the investigated issues.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33202.2616>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: kazemian@eng.usb.ac.ir

How to cite this article:

mousavi, A., & kazemian, A. H. (2024). Vibration Analysis of Sandwich Panel Structures: A Homogenized Simulation Approach with Modal Analysis. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 17-30. doi: 10.22075/jme.2024.33202.2616

آنالیز ارتعاش ساندویچ پنل با رویکرد شبیه سازی همگن با تجزیه و تحلیل مودال

امیر رضا موسوی^۱، امیرحسین کاظمیان^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶	سازه های ساندویچ پنل با هسته های متنوع چه از نظر هندسی و چه از نظر نوع و جنس صفحات، امروزه در صنعت بسیار پرکاربرد، مفید و نیز دارای پتانسیل به جهت ارتقا هستند. در پژوهش حاضر سازه ساندویچ پنل با صفحات آلومینیومی و هسته از جنس اسیدپلی لاکتیک و نیز با هندسه کاروگیت از نوع لانه زنبوری، ساخته شده است و عینا در نرم افزار کتیا طراحی و شبیه سازی شده و سپس در نرم افزار آباکوس مورد بررسی ارتعاشاتی قرار گرفته است. شبیه سازی در دو حالت شبیه سازی کاملا مشابه و در حالت همگن سازی شده صورت گرفته است. در حالت همگن سازی، هسته لانه زنبوری که از جنس اسیدپلی لاکتیک است و دارای خاصیت ایزوتروپیک میباشد، به یک صفحه مسطح با خواص ارتوتروپیک معادل سازی شده است. به جهت اعتبارسنجی شبیه سازی نرم افزاری، آزمایش تجربی مودال نیز بر روی نمونه انجام شده، و نیز نتایج آزمون مودال در نرم افزار N-modal تحلیل شده و نتایج تحلیلی با نتایج آزمون مودال مقایسه شده اند. همچنین نتایج شبیه سازی دارای اتصالات چسبی بدون لحاظ کردن اتصالات چسبی با یکدیگر مقایسه شده اند که نشان میدهد اتصالات چسبی تاثیر چندانی بر شکل مودها و فرکانس ارتعاشات ازاد (کمتر از ۱/۱ درصد) نمی گذارند. نتایج شبیه سازی و نیز آنالیز مودال حاکی از ضریب خطای کمتر از ۷٪ می باشد. میتوان از تکنیک همگن سازی ارائه شده برای هموارتر کردن مسیر شبیه سازی، کاهش زمان لازم و نیز پیچیدگی مسائل استفاده کرد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶	
واژگان کلیدی: پنل ساندویچی، هندسه لانه زنبوری، ساختار کاروگیت، آنالیز مودال، روش اجزا محدود، فرکانس طبیعی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33202.2616>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

نمود. از دلایل اولیه استفاده از صفحات کاروگیت خاصیت ناهمسانگردی، افزایش استحکامات برشی و خمشی نسبت به صفحات تخت می باشد [۱، ۲].

از طرفی دیگر دامنه گسترده ای از ساختارهای ساندویچی مواد ترکیب شده ای با قابلیت های تقویت شده نسبت به حالت مجزای اولیه خود هستند، که با ترکیب شدن این مواد به صورت صفحه ای و لایه های بالا و پایین و با استفاده از یک صفحه کاروگیت یا موج دار در میانشان به عنوان هسته،

۱- مقدمه^۱

صفحات موج دار یا کاروگیت^۲ ساختارهای نوینی هستند که به علت افزایش استحکامات خمشی و برشی قابل توجهی که در مقایسه با صفحات تخت دارند، مورد توجه مهندسين در صنایع مختلفی چون بسته بندی، دریایی، هوافضا و عمرانی، پزشکی و سایر کاربردها قرار گرفته اند. از کاروگیتها می توان به شکل های دوار (لوله های کاروگیت) یا پانلهای ساندویچی با هسته کاروگیت یا صفحات کاروگیت استفاده

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: kazemian@eng.usb.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید

نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه

سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

استناد به این مقاله:

موسوی، امیر، و کاظمیان، امیرحسین. (۱۴۰۳). آنالیز ارتعاش ساندویچ پنل با رویکرد شبیه سازی همگن با تجزیه و تحلیل مودال. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۱۷-۳۰.

doi: 10.22075/jme.2024.33202.2616

Corrugate²

کار به صورت لایه لایه انجام می شود. در این میان اسیدپلی لاکتیک ماده ای است کاملاً زیست تخریب پذیر که چگونگی پاسخ دهی آن به حرارت، باعث دسته بندی و نام گذاری آن شده است. مواد حرارت-پلاستیکی، خصوصاً اسید پلی لاکتیک، در دمای ۱۶۰ الی ۲۲۰ درجه سانتی گراد ذوب می شوند. البته این مهم با توجه به نیاز طراحی خود به جهت تغییر شکل دادن و یا انجام تعمیرات اساسی با استفاده از حرارت دادن یک مزیت هم می باشد. این ماده نمی سوزد بلکه به آرامی آب می شود و در حین آب شدن نیز قابلیت تزریق مجدد در آن وجود دارد. می توان ضعف این ماده را در برخی کاربردها در سازه های ساندویچ پنل با استفاده از صفحات دارای دافع گرما و عایق تا حتی چند صد برابر پوشش داد. ساندویچ پنل های هسته کاروگیت (موج دار) مصارف متعدد و گوناگونی دارند. استفاده در ساخت بدنه کشتی ها و قایق های تندرو، سازه های عمرانی، صنایع مکانیکی مانند تولید انواع شلنگ ها و لوله های کاروگیت، صنایع بسته بندی و کارتن سازی، صنایع پزشکی، در ساخت هواپیما و فضاپیما و ... کاربرد دارند. امروزه از پلاستیک های قابل بازیافت در ساخت قطعات و بدنه خودروهای الکتریکی استفاده شده است. یکی از مهمترین سازه های قابل استفاده ساندویچ پنل های لانه زنبوری هستند که از طرفی استحکام را افزایش داده و به دلیل دارا بودن نقاط خالی در هسته خود وزن سازه کاهش پیدا می کند. دلیل استفاده از اسیدپلی لاکتیک نیز ارزان بودن، در دسترس بودن، نداشتن ضرر برای محیط زیست و زیست تخریب پذیر بودن و سبک بودن آن است. از طرفی به هر سایز، فرم و شکل مورد نظر می توان آن را ساخت. همچنین می توان با ترکیب اسیدپلی لاکتیک با ساختارهای کامپوزیتی متنوع، استحکام فشاری، کششی، مقاومت حرارتی ساندویچ پنل های ساخته شده را افزایش داد. این ماده پتانسیل بسیاری برای استفاده شدن در صنایع هوایی به جهت ساخت هواپیماهای بدون سرنشین، خودروهای نوین و نیز بسیاری صنایع دیگر دارد [۴-۶]. روش های بدون مش یک رویکرد نسبتاً مدرن هستند که به لطف ویژگی های متمایز مانند دقت بالا، انعطاف پذیری، سرعت محاسبه سریع و مقرون به صرفه بودن، علاقه قابل توجهی را در تجزیه و تحلیل و بررسی مشکلات ساختاری پیچیده به دست آورده اند. در یک پژوهش عربزاده و همکاران، روش گالرکین

می توان موادی مستحکم تحت عنوان ساندویچ پانل کاروگیتی ساخت. می توان با انتخاب هندسه های مختلف برای هسته کاروگیت (کلاه شکل، سینوسی، مثلثی، ذوزنقه ای، مستطیلی، لانه زنبوری و ...) و یا مواد مختلف و همچنین پانل های ساندویچی با مواد مختلف برای کاربردهای متفاوت، رفتار مکانیکی و دینامیکی متفاوتی بدست آورد. ساختارهای ساندویچی عموماً از دو پوسته لایه ای بسیار مقاوم و یک لایه هسته با تراکم پایین ساخته می شوند، که به همین دلیل، مزایایی چون وزن کم، سفتی و انعطاف پذیری بالا را دارا می باشند. در چنین ساختارهایی پیش بینی دقیق کمانش و پس کمانش از اهمیت بالایی برخوردار است. در میان انواع هسته ها، لانه زنبوری ها به دلیل ساختار سازه خود همواره دارای بیشترین استحکام بوده و به دلیل خالی بودن میان فضاها درونی، وزن هسته و به طور کلی وزن سازه را کاهش می دهند. کاهش وزن سازه و افزایش استحکام از مهمترین دلایل انتخاب این هندسه می باشد [۳].

ساندویچ پنل های هسته لانه زنبوری در صنایع بسته بندی به دلیل ظرفیت بالای جذب انرژی که آن را به واسطه هندسه خاص خود دارا هستند، و نیز کاهش مصرف مقوا و کارتن ها و نیز وزن سازه تولید شده، سهم بالایی در بازار و صنعت بسته بندی را بدست آوردند. از طرفی دیگر این سازه در صنایع هوافضا به طور گسترده در سطوح کنترل پرواز هواپیما مانند سکان، برآکش^۳ و دیگر اجزای هواپیما وجود دارند. در هواپیماها عموماً صفحات ساندویچ پنل بسیار نازک هستند و از کامپوزیت های لایه ای ساخته می شوند و در هسته عموماً از نومکس^۴، فایبرگلس ها و آلومینیوم استفاده می شود. در صنعت ساختمانی نیز در دیوارهای پوششی و نما، برای سقف ها و دیواره درونی آسانسور استفاده می شود. روش های گوناگونی برای ساخت سازه ها و قطعات وجود دارد. ساخت کاهشی، مانند ماشین کاری است که با برداشتن ماده از یک بلوک به هندسه قطعه نزدیک می شویم. در روش های جابجایی مانند قالب گیری با تغییر شکل و جابجا کردن مواد به شکل نهایی قطعه می رسیم. یکی از نوین ترین روش ها روش ساخت افزایشی است که نام دیگر آن پرینت سه بعدی می باشد. چاپ سه بعدی شامل مجموعه ای از فرآیندها است که مواد به صورت کنترل شده به یکدیگر پیوند داده می شود تا یک شی سه بعدی ساخته شود. معمولاً این

⁴ Nomex

³ spoiler

شعاع‌های متفاوتی در منظور گرفته شد تا اثر مقادیر متفاوت شعاع کاروگیت بر مقاومت تیرها بررسی شود. تیرهای معمولی که دارای جان با صفحه تخت بودند در آزمایشگاه نیز مورد بررسی قرار گرفتند. پنگ و همکاران [۱۱] به بررسی صفحات کاروگیت بر اساس تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول پرداختند. ایشان صفحات ارتوتروپیک و تیرها را با استفاده از انرژی کرنشی بر اساس روش مش‌بندی آزاد گالرکین مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها همچنین نتایج حاصله از خمش و کمانش صفحات کاروگیت را با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس مشاهده کردند. لیو و همکاران به [۱۲] بررسی پاسخ‌های خمش و کمانش سازه دارای هسته لانه‌زنبوری پرداختند. آن‌ها معادلات حرکت هسته را بر اساس اصل همیلتون بدست آوردند و با استفاده از روش گالرکین و نیر سری‌های فوریه، راه حلی تحلیلی برای پاسخ-های خمش، کمانش و ارتعاشات آزاد بدست آوردند. آنالیز انجام شده بر اساس تئوری تغییر شکل جزئی الاستیک خطی است. سازه شبیه‌سازی شده دقیقاً به شکل لانه‌زنبوری نیست. بلکه خانه‌هایی مربع در ابعاد یکسان به عنوان همانند یا جایگزینی برای لانه‌های زنبوری در نظر گرفته شد. مصطفی لیوانی و همکاران [۱۳] به تحلیل فلاتر و کمانش دو محوره پنل‌های ساندویچی مرکب بر مبنای تئوری مرتبه بالا پرداختند. آن‌ها از تابعی درجه دوم برای فرض جابجایی‌های ساندویچ پنل کامپوزیتی استفاده کردند. آن‌ها اثر پارامترهایی چون لایه‌چینی‌های مختلف رویه‌های مرکب، نسبت طول به عرض پنل، نسبت طول به ضخامت پنل و بسیاری پارامترهای دیگر را بررسی کردند. همچنین نتایج حاصل از تئوری را به جهت اعتبار سنجی با چندین مقاله معتبر موجود در مراجع مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش نسبت‌های طول به عرض، طول به ضخامت پنل و مدول الاستیسیته رویه‌ها مرزهای پیداری سیستم کاهش می‌یابد و بیشترین نیروی کمانش بی‌بعد مربوط به پنل ساندویچی با لایه‌چینی زاویه‌ای است. جذب انرژی کامپوزیت‌ها معیار مناسبی برای بررسی عملکرد در برابر بارگذاری ضربه ای است. جاذب‌های انرژی به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. در یک کار آزمایشی جامع، با استفاده از چهار طرح اختلاط پایه، ۶۴ پنل کامپوزیت مستطیلی با مساحت ۱۰۰ میلی‌متر مربع و ضخامت‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ میلی‌متر ساخته شد و با

بدون عنصر به عنوان یک رویکرد بدون شبکه استفاده کردند، که در آن مجموعه‌ای از گره‌های دلخواه در سراسر هندسه مسئله، از جمله مرزهای آن، برای تعریف دامنه مشکل توزیع می‌شوند. تقریب متحرک حداقل مربعات نیز برای فرمول بندی توابع شکل استفاده می‌شود. با توجه به هندسه پیچیده هسته لانه زنبوری در پانل‌های ساندویچ، این مطالعه از روش تعمیم یافته برای استخراج خواص مکانیکی موثر هسته لانه زنبوری استفاده می‌کند. علاوه بر این، برای به دست آوردن میدان‌های جابجایی و ایجاد روابط برای مشکل، نظریه صفحه کلاسیک و نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول به طور مستقل اعمال نمودند در نهایت، پارامترهای به‌دست‌آمده مورد ارزیابی قرار گرفته و اعتبار این روابط با مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج ارائه‌شده در مقالات موجود تأیید می‌شود [۱۷]. تسا و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی خطی و غیرخطی پوسته نازک کاروگیت ذوزنقه‌ای ساده پرداختند. در این مقاله از فرمولاسیون لاگرانژین برای بررسی حرکت و تعیین معادلات استفاده شد. همچنین از روش مش‌بندی تطبیقی و تکنیک روش ماتریس انتقالی^۵ در المان محدود استفاده شد [۸]. پیچیدگی معادلات و روش‌های حل آن‌ها و نیز محدود بودن روش FETM در مودال‌ها و نیز در بر نگرفتن شرایط مرزی پیچیده‌تر و گوناگون از مشکلات این پژوهش بود. به دلیل استقبال بسیار از سازه‌های کاروگیتی در صنایع بسته‌بندی و استفاده روزافزون، هرناندز و سلک [۹] به بررسی نحوه ساخت کاروگیت‌های کارتنی، مزایای استفاده و مقایسه آن‌ها با صفحات معمولی پرداختند. آن‌ها نشان دادند به طور تقریبی یک سازه کاروگیت سینوسی در مقایسه با یک صفحه با ضخامت یکسان بیش از ده برابر مقاومت فشاری و ضربه‌ای دارد و برای رسیدن به این استحکام با صفحات ساده باید از چندین صفحه و به طبع آن با وزن بسیار بیشتری به آن مقامت رسید. همچنین کاستی‌های صنعت در ساخت، پیشنهاداتی برای بهتر شدن، تکنولوژی‌های آینده را مطرح کردند. چان و همکاران [۱۰] اثر کاروگیت بودن جان تیرها بر مقاومت و استحکام تیر را بررسی کردند. تیر با جان از نوع صفحات تخت، کاروگیت سینوسی در جهت عمود و افقی توسط نرم‌افزار مهندسی آنالیز المان محدود لوساس بررسی شدند. رفتار غیرخطی لاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد. همچنین در نمونه‌ها

5. FETM

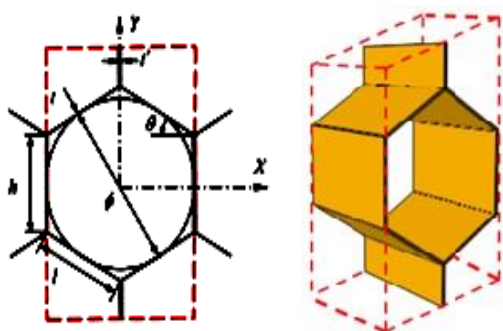
بررسی کردند و مقایسه جذب انرژی، تأثیر قطر انحنا و ناحیه شکست با نمونه‌های صفحه تخت ساخته شده از الیاف شیشه انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که در بین نمونه‌های کامپوزیتی آزمایش شده، نمونه‌هایی با قطر کمتر و انحنا بیشتر درصد کاهش آسیب فیبر و افزایش جذب انرژی را نشان دادند [۲۰، ۲۱]. در یک تحقیق با هدف به دست آوردن رابطه جذب انرژی برحسب پارامتر اینرسی روی سازه مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای به بررسی و مقایسه نظری و عددی رفتار دینامیکی یک مدل متشکل از چهار میله و چهار مفصل الاستیک-پلاستیک تحت اثرات اینرسی در دو حالت تک سلولی و دو سلولی پرداخته شده است. در این تحقیق، و نیز بررسی رفتار دینامیکی پارامترهای موثر و سازوکار فروریزی سازه در دو حالت تک سلولی و دو سلولی خواهد بود. از نتایج به دست آمده مشاهده شد که فروریزش جذب به صورت متقارن دو سویه خواهد بود [۲۲، ۲۳]. مجید حاتم‌پور و همکاران [۲۴] نیز به بررسی تجربی و تحلیل آماری تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل کامپوزیتی پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات صفحه‌ای نانو رس تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. خواص مکانیکی نیز توسط آزمون‌های کشش فشار بدست آمدند. آن‌ها از دستگاه شوک انفجاری و ماده منفجره C4 به منظور بارگذاری انفجاری استفاده کردند. میزان تغییر شکل پلاستیک ساندویچ پنل حاکی از آن است که مدل ارائه شده از دقت بالاتری برخوردار بوده است. در یک تلاش تحقیقاتی بررسی تأثیر شعاع انحنا بر روی پنل‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه که در معرض ضربه با سرعت کم قرار دارند، انجام گرفت. هدف اولیه از مطالعه آنها بررسی رابطه بین قطر انحنا و ظرفیت جذب انرژی کامپوزیت‌ها بود. یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهد که کاهش قطر انحنا منجر به افزایش جذب انرژی می‌شود. علاوه بر این، شعاع انحنا تأثیر قابل توجهی بر بار اوج و مدت بارگذاری و تخلیه دارد [۲۵، ۲۶].

با توجه به مراجع استفاده مشاهده می‌شود که تمرکز بر روی تئوری صفحات کلاسیک و همگن‌سازی در شبیه‌سازی‌ها بوده است. در این مقاله، از تئوری تغییر شکل مرتبه سوم برای بهبود نتایج استفاده شده است. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار کتیا، یک لانه‌زنبوری طراحی و با استفاده از پرینت سه بعدی و ماده پلی‌لاکتیک اسید، تولید شد. سازه ساندویچ پانل با صفحات آلومینیومی و هسته

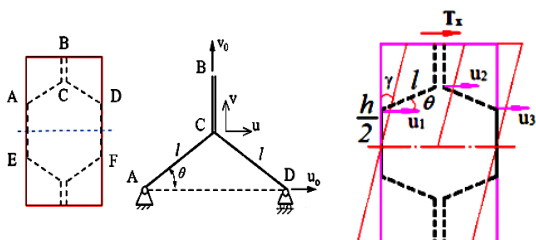
بارگذاری ضربه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی و ورق‌های منبسط شده در ترکیب با یکدیگر فرکانس طبیعی سازه را افزایش داده و جذب انرژی را نیز ذبه میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نیروی پیک اولیه افزایش می‌یابد، در حالی که طول خرد کردن و تغییر شکل نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۱۴]. مینه و همکاران [۱۵] به طراحی و توسعه مدلی تحت عنوان المان صفحه مندلین سه گرهی با کاروگیت سینوسی و دوزنقه‌ای پرداختند. با استفاده از سینماتیک نظریه تغییر شکل برشی مرتبه اول پاسخ‌های ارتعاش را بدست آوردند. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای انسیس و آباکوس انجام شد و همچنین صحت و دقت سنجی با چندین نمونه عددی بررسی شد. در این تحقیق صرفاً حالت کاروگیت در یک جهت سازه وجود دارد و جهت آن طولی است. کاراکوتیه و کار [۱۶] به بررسی خصوصیات تغییر شکل کاروگیت سینوسی با یک تئوری جدید مرتبه بالا پرداختند. آن‌ها این سازه را تحت بارهای گسترده سینوسی و متمرکز قرار دادند. میدان جابجایی با ۹ درجه آزادی در نظر گرفتند که بتوان تمامی حرکات را پیش‌بینی کرد. معادلات ریاضی بدست آمده را می‌توان برای هر نوع پروفایلی تغییر داده و به کار برد تا نتایج جدیدی برای انواع سازه‌ها بدست آورد. حاتمی و همکاران در یک تحقیق، بررسی آزمایشگاهی روی ورقهای فولادی تخت و انحناءدار و همچنین تقویت شده بوسیله سخت‌کننده‌های عمود بر صفحه ورق، تحت اثر ضربه ناشی از سقوط آزاد وزنه مورد بررسی قرار دادند نتایج برای ورقهای با شعاع انحنای تخت، ۳۰۰ و ۱۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده موجب افزایش شتاب وارده به ورق و همچنین کاهش قابل توجه تغییر شکل ماندگار ورق می‌گردد. از طرفی مقدار انرژی جذب شده توسط ورقهای تقویت شده اندکی کمتر از ورقهای ساده است [۱۷، ۱۸]. منگ و همکاران [۱۹] به طراحی و آنالیز لانه‌زنبوری جدیدی پرداختند. در این تحقیق به تحلیل تئوری بیان مساله و حل آن، شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای تعیین خواص مکانیکی معادل متناظر با مدول‌های یانگ، ضرایب پواسون مربوطه و شکست شبه استاتیک پرداخته شده است. جنس نمونه ساخته شده از آلومینیوم می‌باشد. واعظی منش و همکاران و کاراموز در دو مطالعه جداگانه رفتار نمونه‌های کامپوزیت منحنی که در معرض ضربه با سرعت بالا قرار گرفته‌اند را

همچون صنعت خودروسازی، هوافضا و دیگر صنایع مورد توجه قرار گرفته است. به منظور انجام تحلیل المان محدود دقیق و موثر ساختارهای ساندویچی می‌توانند به عنوان یک زنجیره دوبعدی یا سه بعدی چند لایه در نظر گرفته شوند برای انجام این کار معمولاً هسته‌ای که به صورت پیچیده شکل گرفته است مانند یک لایه همگن ارتوتروپیک در نظر گرفته می‌شود بنابراین چالش پیش روی تعیین خواص مکانیکی مواد معادل برای مدل کردن دقیق ساختار ساندویچی می‌باشد که فرمولاسیون تحلیلی در روابط (۱) در دسترس است

در واقع با استفاده از معادلات ارائه شده در بخش بعدی، فرآیند همگن‌سازی، مدل هندسی فرم لانه‌زنبوری به یک صفحه مستطیلی شکل مسطح با خواصی معادل تبدیل شده است. به جهت معادل‌سازی ابتدا یک حجم کنترل از لانه‌زنبوری مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- حجم کنترل فرضی از هسته لانه زنبوری



شکل ۲- (الف) در سمت چپ شماتیک لانه زنبوری و اعمال جابجایی کوچک. (ب) در سمت راست اعمال پیچش با زاویه کوچک

یک جابجایی فرضی در جهت محور طولی اعمال می‌شود تا معادله تعادل برای نیروهای درونی موجود در دیواره‌های لانه‌زنبوری نوشته شود. برای مدول‌های برشی نیز یک زاویه برش کوچک در نظر گرفته می‌شود تا تغییرات کششی و فشاری که اتفاق می‌افتند پیش‌بینی گردند. برای ضرایب پواسون هم از فرمولاسیون مخصوص گیبسون استفاده می‌شود. با استفاده از شکل (۲) خواهیم داشت [۲۷، ۲۸]:

لانه‌زنبوری ساخته شده است. این سازه امکان استفاده در صنایع مختلف را دارد و با بهبود خواص دمایی هسته، قابل استفاده در کشتی‌ها، هواپیماها و صنایع سنگین می‌باشد. همچنین، در محاسبه همگن‌سازی، حالت ایزوتروپیک و اورتوتروپیک در نظر گرفته شده است.

در پژوهش پیش‌رو، یک ساختار لانه‌زنبوری در نرم‌افزار کتیا طراحی شده است. سپس به کمک روش ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی)، یک لانه‌زنبوری تولید شده است و با استفاده از صفحات آلومینیومی که با اتصال چسبی در بالا و پایین به لانه‌زنبوری متصل گشته‌اند، یک ساندویچ پنل هسته کاروگیت فرم لانه‌زنبوری تشکیل شده است. ساندویچ پنل هسته لانه‌زنبوری در دو حالت در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد بررسی و تحلیل ارتعاشات آزاد قرار گرفته است. پیش فرض حالت اول تحلیل سه بعدی است و برای هسته لانه‌زنبوری از جنس اسیدپلی لاکتیک خواصی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده و در حالت دوم توسط معادلات هندسی ارائه شده، عمل همگن‌سازی هسته صورت گرفته و هندسه سه بعدی هسته به یک صفحه مسطح دو بعدی با خواص ارتوتروپیک معادل تبدیل شده است.

جنبه نوآوری پژوهش پیش‌رو را می‌توان در هندسه و سازه خاص ساخته شده از جنس اسیدپلی لاکتیک و پرینت سه بعدی و ایجاد ساندویچ پنل مورد بررسی، نحوه ساخت آن، شیوه استفاده شده در آنالیز مودال و نیز تکنیک استفاده شده در آزمون مودال تجربی و نیز استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند N-Modal برای تحلیل ارتعاشات و نیز بدست آوردن فرکانس‌های ارتعاش آزاد، و استفاده از روش معادل‌سازی لانه‌زنبوری و بدست آوردن خواص معادل برای هندسه سه بعدی هسته و تبدیل آن به یک صفحه دو بعدی دانست. همچنین اثر اتصالات چسبی بر ارتعاشات آزاد نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل هندسی

سازه‌هایی با هسته‌های کاروگیت به طور فزاینده‌ای به عنوان اجزای چند منظوره در بسیاری از کاربردها و زمینه‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند معادل‌سازی فرآیندی است که در آن می‌توان به جای مدل سازی یک هندسه پیچیده و سه‌بعدی، از یک جایگزین مسطح دوبعدی با خواصی معادل شده در جهت‌های مختلف استفاده کرد. هدف از این امر تسهیل در محاسبات و کاهش زمان مورد نیاز می‌باشد. این امر امروزه در صنایع گوناگونی

$$E_y^* = \frac{\sigma_y^*}{\varepsilon_y^*} = \frac{E.t(v_0 - v)}{h.l.\cos(\theta)} \cdot \frac{h+l.\sin(\theta)}{v_0} \quad (11)$$

$$E_z^* = E_t \frac{t}{l} \cdot \frac{h+l}{(h+l.\sin(\theta))\cos(\theta)} \quad (12)$$

$$v_{xy} = \frac{\cos^2(\theta)}{\left(\frac{h}{l} + \sin(\theta)\right)\cos(\theta)} \quad (13)$$

$$v_{xz} = \frac{E_x}{E_z} v_{zx}, \quad v_{yz} = \frac{E_y}{E_z} v_{zy} \quad (14)$$

$$G_{xz} = G_s \frac{t}{l} \frac{\cos(\theta)}{\left(\frac{h}{l} + \sin(\theta)\right)} \quad (15)$$

به طور مشابه مدول یانگ در جهات دیگر نیز محاسبه میشود. برای مدول های برشی نیز یک زاویه برش کوچک در نظر گرفته میشود تا تغییرات کششی و فشاری که اتفاق میافتند پیشبینی گردند. برای ضرایب پواسون هم از فرمولاسیون مخصوص گیبسون استفاده میشود. در نهایت خواهیم داشت:

$$G_{yz} = G_s \frac{t}{l} \frac{\frac{h}{l} + 1}{\left(\frac{h}{l} + \sin(\theta)\right)\cos(\theta)} \quad (16)$$

$$G_{xy} = G_s \frac{t}{l} \sin(\theta)\cos(\theta) \quad (17)$$

جدول ۱- خواص ساندویچ پنل آلومینیومی با هسته کاروگیت لانه زنبوری اسید پلی لاکتیک [۲۰]

کمیت	واحد	اسید پلی لاکتیک	آلومینیوم
مدول یانگ	GPa	4.107	69
ضریب پواسون	MPa	0.3	0.33
چگالی	$\frac{gr}{Cm^3}$	1.24	2.7
عرض	mm	80.8	81
طول	mm	200.4	200.6
ارتفاع	mm	12.7	2
فاصله بین لانه زنبوری ها	mm	2	-
طول وجوه لانه زنبوری	mm	3.6	-

$$\varepsilon_x = \frac{u_0}{2l\cos(\theta)}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{v_0}{h+l.\sin(\theta)} = -v\varepsilon_x = -v \frac{u_0}{2l\cos(\theta)}$$

$$\rightarrow v_0 = -vu_0 \frac{h+l.\sin(\theta)}{2l\cos(\theta)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_l = \frac{1}{l}(u\cos(\theta) + v\sin(\theta)) \quad (3)$$

$$N_l = \sigma_l b.t = \frac{E.b.t}{l}(u\cos(\theta) + v\sin(\theta)) \quad (4)$$

$$N_h = \frac{v_0 - v}{h} . 2.b.t \quad (5)$$

جایگه $\varepsilon, u, v, h, l, N, \sigma, b, t$ جایگه x ، جابجایی در راستای y ، طول سازه، نیروی محوری، عرض و ضخامت سازه در راستای تعریف شده می‌باشند. برای تعادل حول نقطه C خواهیم داشت:

$$N_h = 2N_l \sin(\theta) \quad (6)$$

از معادلات (۴) الی (۶) خواهیم داشت:

$$l(v_0 - v) = h \sin \theta (u \cos(\theta) + v \sin(\theta)) \quad (7)$$

یا به عبارتی دیگر:

$$v = \frac{v_0 - \frac{h}{4l} \sin^2(\theta) u_0}{l + \frac{h}{l} \sin^2(\theta)} \quad (8)$$

از طرفی دیگر:

$$P_x = N_l \cos(\theta) = \frac{E.b.t}{l} \quad (9)$$

$$\cdot (u \cos(\theta) + v \sin(\theta)) \cos(\theta)$$

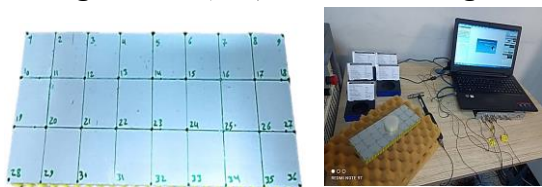
در نهایت برای برای معادل خواهیم داشت:

$$E_x^* = \frac{\sigma_x^*}{\varepsilon_x^*} = 2.E.b.t \times \frac{(u \cos(\theta) + v \sin(\theta)) \cos^2(\theta)}{(h+l.\sin(\theta))b.u} \quad (10)$$

به طور مشابه مدول یانگ در جهت دیگر نیز محاسبه میشود. برای مدول های برشی نیز یک زاویه برش کوچک در نظر گرفته میشود تا تغییرات کششی و فشاری که اتفاق می‌افتند پیشبینی گردند. برای ضرایب پواسون هم از فرمولاسیون مخصوص گیبسون استفاده میشود. در نهایت خواهیم داشت:

۴- آزمایش تجربی

به جهت انجام این آزمون به یک چکش ضربه، سنسورهای شتاب‌سنج، یک مبدل و سیستم کامپیوتری احتیاج است.



الف) ملزومات آزمون
ب) شبکه‌بندی ساندویچ پنل

شکل (۴) آماده سازی سازه جهت آزمون مودال

مطابق شکل (۴) در ابتدا سازه تقسیم و سلول بندی شده است. بدین صورت که در جهت طولی به سه بخش مساوی و در جهت عرضی به هشت قسمت مساوی تقسیم شده و در نتیجه ۳۶ نود شکل گرفته است. شبکه‌بندی برای تشخیص نقاط ضربه در آزمون مودال اهمیت دارد. در واقع توسط چکش ضربه، به هر کدام از این نقاط در محدوده فرکانسی معینی ضربات وارد شده است. حساسیت چکش استفاده شده نیز $1.8mm/N$ می‌باشد. در هر نود، سه ضربه چکش صحیح ذخیره گشته تا میانگین نتایج بدست آمده ذخیره گردد. ضرباتی که چند فرکانسی و تکراری باشند حذف شده هستند. مشخصات نامی سنسورهای استفاده شده و نیز محل قرارگیری آن‌ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- مشخصات سنسورها

محل قرارگیری	حساسیت سنسور	شماره سنسور
نود ۱۱	۳/۲	۱
نود ۲۵	۲/۹۴	۲
نود ۳۱	۲/۹۶	۳

همچنین در نقاط دارای سنسور، ضربات در نزدیک‌ترین حالت ممکن به آن نود وارد شده است. نتایج به صورت فایل مخصوص در فرمت UFF ذخیره گشت و در نرم‌افزار N-Modal مورد تحلیل قرار گرفت. بدیهی است که کیفیت آزمون مودال و در نتیجه دقت نتایج، وابسته به اجرای صحیح ضربات چکش، حذف ضربات نادرست، دقت بیشتر در نقاط دارای سنسور می‌باشد. وزن سنسورها در حدود یک گرم می‌باشد. دقت سنسورها نیز در بازه $۲/۹۶ - ۳/۲$

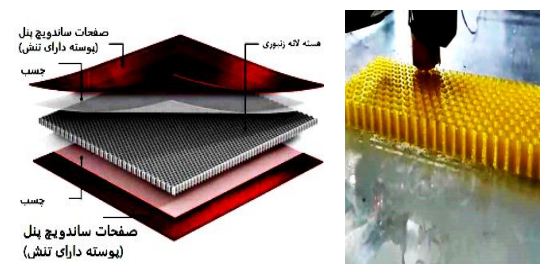
جاییکه E_{ij} , G_{ij} به ترتیب مدول الاستیسیته و صلبیت در راستای مشخص شده می‌باشند.

خواص ساندویچ پنل با هسته کاروگیت از نوع لانه‌زنبوری در جدول ۱ آمده است. با استفاده از فرمولهای ذکر شده و جایگذاری مقادیر جدول ۱ میتوان به خواص حالت همگن- شده ارتوتروپیک دست یافت [۲۰].

۳- ساخت نمونه پنل ساندویچی

اسیدپلی‌لاکتیک نوعی پلاستیک با قابلیت زیست تخریب پذیر می‌باشد. این بیوپلاستیک توسط نشاسته، نیشکر یا چپس‌ها تولید می‌شود. این ماده توانسته استفاده از مواد خام شیمیایی نفتی و همچنین اثرات کربنی را کاهش دهد. اسیدپلی‌لاکتیک متنوع‌ترین پلیمر زیستی موجود است. در صنایع بسته‌بندی، حوزه سلامت، تجهیزات پزشکی که باید بیوپلاستیک باشند، قطعات خودرو و بسیاری دیگر از کاربردهای وسیع و مهم این ماده را می‌توان نام برد. این ماده با حرارت دادن و سرد شدن به موقع به انواع هندسه‌ها و شکل‌های مورد نظر تبدیل می‌گردد. همچنین پس از تجزیه شدن و در نتیجه حرارت دیدن، هیچ ماده سمی تولید نمی‌کند. البته می‌توان با افزودن مواد پلیمری و مشتقات آن، تغییر بسزایی در خواص محصول نهایی ایجاد کرد.

مطابق شکل (۳) در ابتدا سازه مورد نظر در نرم افزار تجاری کتیا طراحی شده سپس در نرم افزار آباکوس برای تحلیل ارتعاشات آزاد مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا هسته لانه‌زنبوری طراحی شده در کتیا به روش تزریق و پرینت سه بعدی از جنس اسیدپلی‌لاکتیک ساخته شد.



الف) فرآیند ساخت

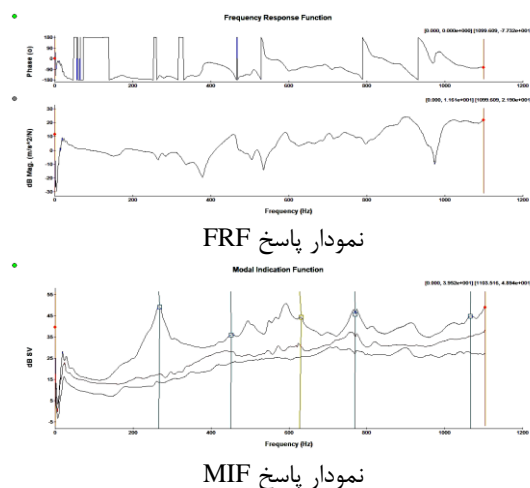
ب) محل قرارگیری چسب در

ساندویچ پنل

شکل ۳- ساخت نمونه پنل ساندویچی

این سازه توسط لایه‌ای از چسب به جنس رزین اپوکسی شماره ۸۲۸ با هاردنر ۱۰٪ به صفحات آلومینیوم از بالا و پایین متصل گردید. این اتصال حتی الامکان یکدست و کاملاً صاف صورت گرفته است.

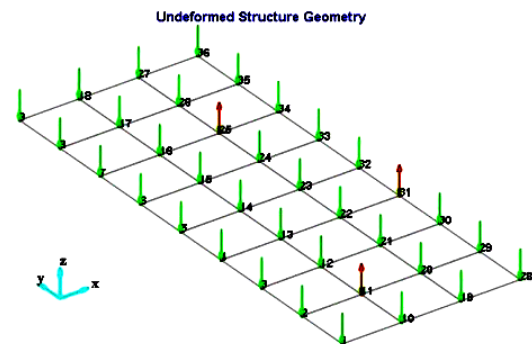
نرم افزار N-Modal میباشد. این نمودار فرکانس‌های مربوط به هر سه ضربه وارده را نمایش میدهد. خطوطی به صورت عمود به گونه‌ای که از هر سه نمودار عبور کرده و تقریباً در هر سه نمودار همزمان قله‌ها را طی کرده باشند، نشان‌دهنده مقادیر فرکانسهای اصلی هستند. این نمودار یک نمایش گرافیکی است که اطلاعاتی درباره الگوهای حالت و فرکانس‌های طبیعی متناظر آنها در یک سیستم سازه‌ای ارائه می‌دهد. نمودار MIF به طور معمول برای بصری‌سازی و تحلیل رفتار لرزشی یک سازه استفاده می‌شود و معمولاً از مجموعه‌ای از منحنی‌ها یا خطوط تشکیل شده است که هر کدام نشانگر یک الگوی حالت می‌باشد. محور X محدوده فرکانس را نمایش می‌دهد، در حالی که محور Y مقدار تابع نشانگر حالت را نشان می‌دهد. تابع نشانگر حالت یک معیاری برای مشارکت هر درجه آزادی در یک الگوی حالت خاص است. در نقاطی که به صورت هم‌زمان و به اشتراک قله وجود دارد، می‌توان استدلال بر تعیین مود شکل‌های اصلی ارتعاش داشت. اما باید به انطباق مودهای ارتعاش در جهات عرضی و طولی بر یکدیگر توجه داشت. مطابق شکل (۶) نمودار تابع پاسخ فرکانسی، فرکانس‌های اصلی در بازه ۲۵۰ الی ۱۱۱۵۰ هرتز می‌باشند. مجموعه نتایج آنالیز مودال به شرح زیر است.



شکل ۶- نمودار پاسخ فرکانسی سیستم

همانگونه که مشاهده می‌گردد در نمودار پاسخ فرکانسی (MIF) سیستم برای یک سازه کامپوزیتی، نمودار به صورت صعودی است و این به دلیل وجود حالت‌های رزونانس در سازه می‌باشد. هنگامی که فرکانس اعمالی به سازه نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم می‌شود، رزونانس

(mv/gr) می‌باشد و معمولاً پس از هر ۲۰ بار تست کالیبره می‌گردند و از آنها مطابق شکل (۵) در نقاط به شماره ۱۱، ۲۵ و ۳۱ استفاده شده است.



شکل ۵- محل برخورد ضربات چکش بر روی نودها و محل قرارگیری سنسورها

هدف از انتخاب این نودها برای محل قرارگیری سنسورها، منطبق نبودن محل قرارگیری سنسورها در یک مود ارتعاشی یکسان می‌باشد. در گذشته مستقیماً با استفاده از FRF^۶ها، نتایج بدست می‌آمدند اما باید دقت شود که ریزجابجایی‌ها و خطاهای سیستمی و نیز پاسخهای نادرست، خصوصاً چند قله‌ایها می‌توانند به نادرست یک فرکانس و شکل مود اصلی تلقی شوند. لیکن برای جلوگیری از نتیجه‌گیری نادرست باید تحلیل را بسط داد و از نمودارهای دیگر برای بررسی دقیقتر بهره مند شد. در واقع اگر آزمون مودال به درستی و با کیفیت لازم انجام شده باشد، نمودار تابع پاسخ فرکانسی قطعاً پاسخ مساله ما که همان مقادیر مربوط به فرکانس ارتعاشات آزاد و شکل مودهای اصلی است را شامل می‌باشد. صرفاً باید با استفاده از داده‌ها و نتایج کامل‌تری بتوان به پاسخ نهایی یا همان مقادیر درست فرکانس‌ها دست یافت

تابع پاسخ فرکانسی داده‌های ورودی به نرم افزار N-Modal به چندین نمودار و در واقع پاسخ نتیجه میشوند. مهمترین گام تعیین و تشخیص مود شکل‌های اصلی و انتخاب فرکانسهای صحیح از روی نمودارها و جداول موجود میباشد. نمودار تابع پاسخ فرکانسی بیانگر محل قرارگیری مودهای اصلی است. هر فاز حرکتی نشان‌دهنده جابجایی و تغییر شکل کلی سازه میباشد [۲۹]. نقاط اوج نیز همان شکل مودهای اصلی هستند. شکل (۶) بیانگر نمودار MIF^۷ است، در تجزیه و تحلیل مودال، نمودار MIF به نمودار تابع نشانگر حالت اشاره دارد و از نتایج حاصله از تحلیل‌های

^۷ Mode Indicator Function

^۶ Frequency Response Function

جدول مک (جدول ۳) نیز همان نتایج نمودار مک را نشان می‌دهد. تفاوت در اعداد درایه‌های موجود است که در این نمودار بیانگر درصد میباشند. جدول مک کمک شایانی در تحلیل بهتر نمودار مک دارد. در این جدول باقی درایه‌های خارج از قطر فرعی باید صفر باشند. ۱۰۰ بودن درایه‌های قطراسلی نشان دهنده فرکانس مودشکل‌های اصلی ارتعاشات آزاد است و باقی درایه‌ها بیانگر خطاها و باقیمانده انرژی در نقاط مختلف جسم هستند که جسم را دچار لرزشهای بسیار کوچکی می‌کنند.

جدول ۳- جدول مک پاسخ فرکانسی

فرکانس و مود	۲۶۶/۹	۴۵۰/۵	۶۲۷/۹	۷۶۹/۳	۱۰۶۶/۶
۱	۱۰۰	۳/۵	۰	۲۸/۸	۵/۶
۲	۳/۵	۱۰۰	۲۱/۹	۷/۵	۱/۱
۳	۰	۲۱/۹	۱۰۰	۴/۳	۰/۳
۴	۲۸/۸	۷/۵	۴/۳	۱۰۰	۷/۴
۵	۵/۶	۱/۱	۰/۳	۷/۴	۱۰۰

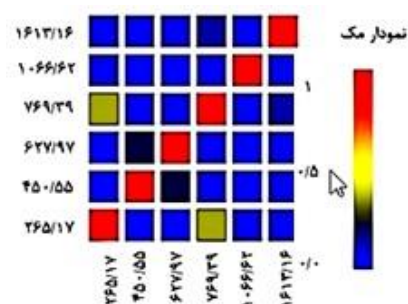
در نقاطی که شباهت بین شکل مودهای عرضی و طولی وجود دارد، هر مقدار این شباهت و انطباق با شکل مود دیگری در جهت دیگر، بیشتر باشد، فاصله اعداد با صفر بیشتر میگردد. به عنوان مثال شکل مود چهارم دارای کمیت ۲۸.۸ درصد میباشند که بیانگر این مهم است که این شکل یک مود ارتعاشی در راستای عرضی است که خود مشابه شکل مود اول در راستای طولی میباشند و به صورت مشابه نیز شکل مود سوم در راستای عرضی با شکل مود دوم در راستای طولی تداخل و تشابه دارند. همانند نمودار مک، در جدول مک نیز درایه‌های افقی و عمودی بیانگر فرکانسها میباشند. مود شیپ‌های تعیین شده توسط آزمون مودال، نمودار FRF و نرمافزار modal-N در شکل (۸) نشان داده شده است.

در نمودارها و شکل‌های به دست آمده از آنالیز فرکانسی یک سازه کامپوزیتی مستطیل شکل، مودها چندگانه هستند، به این معنی که برای هر فرکانس طبیعی، یک مود متناظر وجود دارد. مهمترین مودها در این سازه می‌توانند عبارت باشند از:

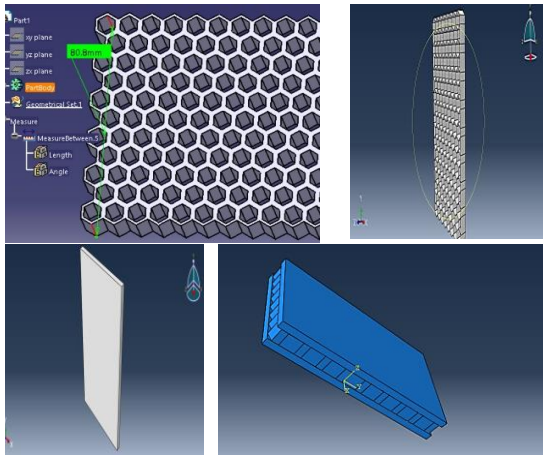
مود اصلی (Mode 1): این مود نشان دهنده اولین فرکانس طبیعی سازه است و بیشترین تاثیر را در پاسخ فرکانسی دارد. مود دوم (Mode 2): این مود نشان دهنده دومین فرکانس طبیعی سازه است و در شکل و ثبات سازه تأثیرگذار است. مود سوم (Mode 3): این مود نشان دهنده

رخ می‌دهد و سازه به شدت تحریک می‌شود. در این حالت، نیروهای دینامیکی به طور مشخصی در سازه ایجاد می‌شود که باعث افزایش پاسخ فرکانسی سیستم در نمودار MIF می‌شود. با افزایش فرکانس اعمالی، سازه به حالت‌های رزونانس بعدی می‌رسد و پاسخ فرکانسی به صورت صعودی ادامه می‌یابد. این روند مشخص می‌کند که سازه در فرکانس‌های بالاتر به شدت تحریک می‌شود و نسبت به آن پاسخ می‌دهد.

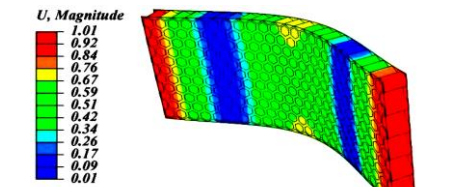
پس از انتخاب فرکانس‌ها و مودشیپ‌های اصلی، این نتایج باید صحت‌سنجی شوند. در واقع ممکن است بیش از تعداد منطقی و مورد نظر فرکانس و یا مودشکل اصلی در نمودار تابع تعیین مود وجود داشته باشد. تشخیص صحیح و ناصحیح بودن این فرکانس‌ها توسط دو ابزار بسیار ارزشمند دیگر تحت عنوان نمودار مک و جدول مک صورت می‌گیرد نمودار مک، نموداری رنگ‌بندی شده است (شکل ۷) که هر رنگ بیانگر یک عدد، کمیت معین یا در واقع ملاکی برای سنجش صحت فرکانس‌های انتخابی است [۳۰]. رنگ آبی به معنای صفر، رنگ قرمز یک و رنگ‌های دیگر مانند زرد متمایل به یک و یا مانند طوسی متمایل به صفر هستند. طول و عرض این نمودار اعداد فرکانس شکل مودهای اصلی است. قطر فرعی این نمودار قرمز رنگ است که بیانگر عدد یک یا همان فرکانس‌های اصلی می‌باشد. باقی درایه‌ها باید آبی‌رنگ یا صفر باشد. اگر درایه‌های آبی رنگ نباشد دو نتیجه می‌توان برداشت کرد. اول اینکه فرکانس‌های اصلی انتخاب شده به درستی گزینش نشدند و یک فرکانس اصلی به اشتباه انتخاب شده است. دوم اینکه ممکن است فرکانس انتخابی هم در جهت طولی و نیز هم در جهت عرضی یک مود شکل اصلی را شامل شود. در این پژوهش مودشکل‌ها، و فرکانس‌های اصلی در جهت‌های عرضی و طولی منطبق بر یکدیگر هستند به همین دلیل درایه‌های غیر صفر و یک متقارن در نمودار مک بوجود آمده‌اند.



شکل ۷- نمودار مک در تحلیل فرکانسی

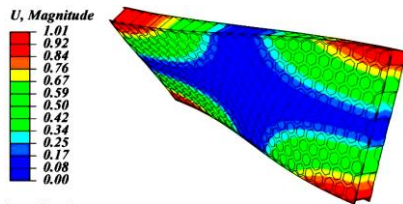


شکل ۹- مدلسازی سازی سازه در نرم افزار کتیا و شبیه سازی در نرم افزار آباکوس



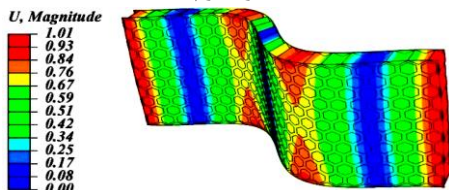
Step: Step-1
Mode 1: Value = 1.04816E+08 Freq = 282.86 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.00e+01

مود اول



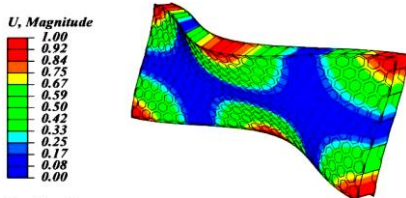
Step: Step-1
Mode 2: Value = 1.36260E+08 Freq = 477.58 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.00e+01

مود دوم



Step: Step-1
Mode 3: Value = 4.29751E+08 Freq = 659.36 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.00e+01

مود سوم



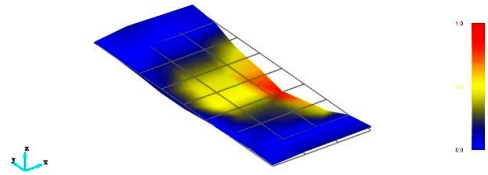
Step: Step-1
Mode 4: Value = 4.69087E+08 Freq = 792.47 (cycles/time)
Primary Var: U, Magnitude
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.00e+01

مود چهارم

شکل ۱۰- مود شیپ‌های بدست آمده در شبیه سازی عددی

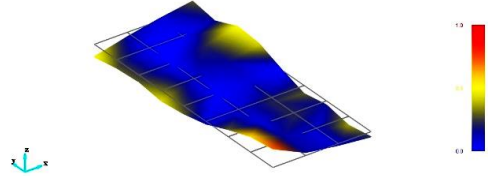
سومین فرکانس طبیعی سازه است و می‌تواند در تحلیل نویز و ارتعاشات سازه اهمیت داشته باشد. به طور کلی، تعداد و نامگذاری مودها بستگی به شرایط و خواص سازه دارد و ممکن است بیشتر از این مودها وجود داشته باشد.

NarBand : Mode 1 - Freq: 266.92Hz, Damp: 2.10%



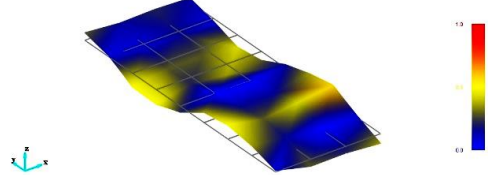
مود اول

NarBand : Mode 2 - Freq: 469.65Hz, Damp: 3.07%



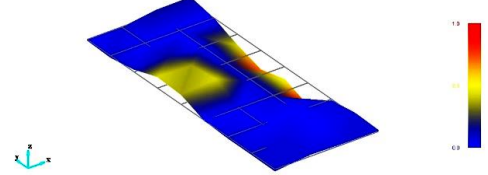
مود دوم

NarBand : Mode 3 - Freq: 627.97Hz, Damp: 1.22%



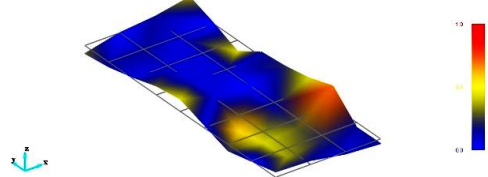
مود سوم

NarBand : Mode 4 - Freq: 769.39Hz, Damp: 0.91%



مود چهارم

NarBand : Mode 6 - Freq: 1066.62Hz, Damp: 0.92%



مود پنجم

شکل ۸- مود شیپ‌های بدست آمده در آزمون مودال

۵- شبیه سازی دینامیکی

در ابتدا سازه لانه‌زنبوری طراحی شده در کتیا که توسط پرینت سه بعدی ساخته شده، در نرم افزار آباکوس وارد شده (شکل ۹) و به طور کلی اجزای ساندویچ پنل مونتاژ می‌گردند. صفحه میانی یا هندسه هسته، یک لانه‌زنبوری می‌باشد.

شبیه‌سازی با اختلافی کمتر از ۱۰٪ نشان‌دهنده کارآمد بودن روش همگن‌سازی ارائه‌شده می‌باشد. در انتها شایان ذکر است که اتصالات چسبی تاثیر چندانی در اعداد فرکانسی نداشته و بیانگر این مهم است که اثر شبیه‌سازی این اتصالات بر روی فرکانس‌های طبیعی تقریباً برابر با صفر درصد می‌باشد.

جدول ۵- درصد خطای فرکانس‌های بدست آمده در حالت های آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی

شماره مود	مدل المان محدود ایزوتروپیک با آنالیز مودال	مدل المان محدود ایزوتروپیک با آزمون مودال	مدل المان محدود ایزوتروپیک با آنالیز مودال
۱	۵/۶۳	۶/۶۶	۱/۱
۲	۵/۶۵	۵/۵۹	۰/۹۹
۳	۴/۷	۷/۲	۱/۲
۴	۲/۹۱	۳/۸۷	۱
۵	۴/۷۶	۵/۷	۰/۹۹

۷- نتیجه‌گیری

ساده و روان‌سازی محاسبات، شبیه‌سازیها و نیز کاهش مدت زمان پژوهش از اولویت‌های پژوهشی در صنعت می‌باشد. این پژوهش سعی بر آن داشت تا با ارائه روشی متفاوت بتواند هندسه‌های پیچیده را به سطوحی مسطح و ساده با خواص ارتوتروپیک معادل‌سازی نماید. همچنین از روشهایی به‌روزرسانی‌شده برای تحلیل نمودارها در استخراج فرکانس‌های طبیعی در آزمون مودال استفاده شده است. برای این منظور استفاده از معادلات نوشته شده خواص ارتوتروپیک سازه لانه‌زنبوری محاسبه شدند، سپس لانه زنبوری مورد نظر در نرم افزار کتیا طراحی شده و عیناً توسط روش پرینت سه بعدی ساخته شد. در قدم سوم آزمون مودال بر روی سازه ساخته‌شده انجام شد. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس با نتایج بدست‌آمده مقایسه می‌شوند تا صحت شبیه‌سازی و در واقع کارآمدی روابط همگن‌سازی و خواص محاسبه‌شده، بررسی گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو و سه بعدی و نیز فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از تحلیل عددی و همچنین آزمون تجربی مودال، به ترتیب دارای اختلافی کمتر از ۳٪ و نیز در مقایسه شبیه‌سازی دو بعدی و آزمون تجربی دارای اختلافی کمتر از ۷٪ می‌باشند. این مقادیر

مرسوم است که اسیدپلی‌لاکتیک ماده‌ای ایزوتروپ می‌باشد پس در حالت اول خواص ایزوتروپیک بر روی هسته اعمال می‌شوند. از طرفی دیگر هدف حذف پیچیدگی‌های هندسه هسته می‌باشد، پس در حالت دوم نیز با استفاده از روش همگن‌سازی ارائه‌شده، به جای هسته لانه‌زنبوری، یک صفحه ارتوتروپیک مسطح با خواص معادل جایگزین می‌گردد. در حالت ایزوتروپیک تعداد ۵۶۷۹۷ عدد المان تتراهدرال بر روی هندسه هسته لانه‌زنبوری تشکیل شده است. در حالت همگن‌سازی شده و ارتوتروپیک نیز، ۱۱۸۲۰ عدد المان بر روی هسته مستطیلی و مسطح همگن‌شده، شکل گرفته است. مودشکلها و فرکانسهای اصلی به عنوان جوابهای مورد نظر استخراج شدند. مقدار ویژه تنظیم‌شده ۱۰ می‌باشد. همچنین اتصال چسبی در حالت اول شبیه‌سازی شده که در نتایج فرکانسی تاثیری نداشته و به همین دلیل برای تحلیل نهایی اتصال هسته و صفحات ساندویچ به صورت یکپارچه و سراسری در نظر گرفته شد. در شکل (۱۰) چهار فرکانس اول سازه به همراه مود شیپ مربوطه ارائه شده است.

۶- نتایج و بحث

مطابق جدول ۴ نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری و نتایج حاصل از آنالیز مودال با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

جدول ۴- فرکانس‌های بدست آمده برای مودشکل‌های اصلی

شماره مود	آزمون مودال تجربی	تحلیل المان محدود در حالت همگن- ایزوتروپیک	تحلیل المان محدود در حالت همگن- ایزوتروپیک
۱	۲۶۶/۹۲	۲۸۲/۸۶	۲۸۵/۹۸
۲	۴۵۰/۵۵	۴۷۷/۵۸	۴۸۲/۳۵
۳	۶۲۷/۹۷	۶۵۹/۳۶	۶۶۷/۲۵
۴	۷۶۹/۳۹	۷۹۲/۴۷	۸۰۰/۳۹
۵	۱۰۶۶/۶۲	۱۱۱۹/۹۳	۱۱۳۱/۱۲

این جدول بیانگر تطابق نتایج آزمون مودال با شبیه‌سازی عددی می‌باشد و همچنین نتایج حاصله از شبیه‌سازی مشخصات ارتعاشی ساندویچ‌پنل با هسته کاروگیت لانه‌زنبوری همگن‌سازی‌شده نشان می‌دهد که برای کاهش پیچیدگی‌های شبیه‌سازی و حذف هندسه‌های پیچیده، می‌توان به روش همگن‌سازی ارائه‌شده اکتفا کرد چرا که طبق جدول ۵ نتایج ارائه‌شده خطایی کمتر از ۷٪ را ارائه می‌دهند. از طرفی دیگر انطباق نتایج عددی، تجربی و

تعارض منافع

نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

نشان دهنده صحت و دقت لازم در شبیه سازی های صورت گرفته، آزمون تجربی مودال و نیز کارآمدی روش همگن سازی استفاده شده می باشد.

۸-مراجع

- [1] I. Dayyani and A. Shaw and E.S. Flores, and M. Friswell. "The mechanics of composite corrugated structures: A review with applications in morphing aircraft." *Composite Structures* 133 (2015): 358-380.
- [2] J. Jia and Y. Li. "Deep learning for structural health monitoring: Data, algorithms, applications, challenges, and trends." *Sensors* 23, no. 21 (2023): 8824.
- [3] B. Suarez and M. Muneta and J.D. Sanz-Bobi, and G. Romero. "Application of homogenization approaches to the numerical analysis of seating made of multi-wall corrugated cardboard." *Composite Structures* 262 (2021): 113642.
- [4] W. J. Chong. "Additive manufacturing of antibacterial PLA-ZnO nanocomposites: Benefits, limitations and open challenges." *Journal of Materials Science & Technology* 111 (2022): 120-151.
- [5] Y. S. Kushwaha and N.S. Hemanth and N.D. Badgayan and S.K. Sahu. "Free vibration analysis of PLA based auxetic metamaterial structural composite using finite element analysis." *Materials Today: Proceedings* 56 (2022): 1063-1067.
- [6] A. Jafari and A.H. Kazemian and H. Rahmani. "Investigating of Vibration Properties of Aluminum Plates in Radii of Different Curvatures Reinforced with Glass Fibers by Modal Analysis Method Experimentally and Numerically." *Fibers and Polymers* (2024).
- [7] A. Arabzadeh and S. Sarrami, and M. Azhari. "Free-Vibration, Buckling, and Static Analysis of Sandwich Panels With a Square Honeycomb Core Using a Meshfree Method." *International Journal of Structural Stability and Dynamics* (2023): 2450177.
- [8] A. Tesar. "Ultimate dynamics of corrugated shells". *Computers & Structures* 69, no. 2 (1998): 159-170.
- [9] R. Hernandez and S. Selke. "Packaging: Corrugated Paperboard." *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (2001) 6637-6642.
- [10] C. Chan and Y.A. Khalid and B.B. Sahari and A. Hamouda. "Finite element analysis of corrugated web beams under bending." *Journal of Constructional Steel Research* 58, no. 11, (2002): 1391-1406.
- [11] L. Peng and K. Liew and S. Kitipornchai. "Analysis of stiffened corrugated plates based on the FSDT via the mesh-free method." *International Journal of Mechanical Sciences* 49, no. 3 (2007): 364-378.
- [12] J. Liu and Y. Cheng and R. Li, and F. Au. "A semi-analytical method for bending, buckling, and free vibration analyses of sandwich panels with square-honeycomb cores." *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 10, no. 01 (2010): 127-151.
- [13] M. Livani and D. Scrocca and P. Arecco and C. Doglioni. "Structural and stratigraphic control on salient and recess development along a thrust belt front: The Northern Apennines (Po Plain, Italy)." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123, no. 5 (2018): 4360-4387.
- [14] H. Hatami and A. Dalvand and A. S. Chegeni. "Experimental investigation of impact loading effects on rectangular flat panels of fiber self-compacting cementations composite with expanded steel sheet." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42 (2020): 1-23.
- [15] N. Nguyen-Minh and N. Tran-Van and T. Bui-Xuan and T. Nguyen-Thoi. "Free vibration analysis of corrugated panels using homogenization methods and a cell-based smoothed Mindlin plate element (CS-MIN3)." *Thin-Walled Structures* 124 (2018): 184-201.
- [16] A. Karakoti and V.R. Kar. "Deformation characteristics of sinusoidally-corrugated laminated composite panel—A higher-order finite element approach." *Composite Structures* 216 (2019): 151-158.
- [17] S. A. Mousavizadeh and M. Hosseini and H. Hatami. "Experimental Studies on Energy Absorption of Curved Steel Sheets under Impact Loading and the Effect of Pendentive on the Deformation of Samples." *Journal of Modeling in Engineering* 18, no. 63 (2021): 27-40.
- [18] H. Hatami and M. Hosseini. "Elastic-plastic analysis of bending moment–axial force interaction in metallic beam of T-Section." *Journal of Applied and Computational Mechanics* 5, no. 1 (2019): 162-173.

- [19] M.F. Guo and H. Yang, and L. Ma. "Design and analysis of 2D double-U auxetic honeycombs." *Thin-Walled Structures* 155 (2020): 106915.
- [20] A.V. Manesh and A.H. Kazemian and H. Rahmani. "The effect of convexity in energy absorption of E-glass reinforced epoxy composites under high velocity impact: An experimental and numerical investigation." *Polymer Composites* 44, no. 12 (2023) 8615-8626.
- [21] M.R. Karamooz and H. Rahmani and H. Khosravi. "Hybrid effects of basalt and kevlar fibers on low-velocity impact behavior of epoxy-based composites." *Fibers and Polymers* 21 (2020): 2590-2598.
- [22] H. Hatami and A. Fathollahi. "Theoretical and numerical study and comparison of the inertia effects on the collapse behavior of expanded metal tube absorber with single and double cell under impact loading." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 50, no. 5 (2018): 999-1014.
- [23] M.R. Karamooz and H. Rahmani and H. Khosravi. "Numerical and experimental investigations on the low-velocity impact properties of hybrid Kevlar fiber/basalt fiber reinforced epoxy composites: Effects of impactor nose shape and fiber stacking sequences." *Polymer Composites* 42, no. 12 (2021): 6442-6454.
- [24] M. Hatampour and R. Hosseini and M. Hasanzadeh, and K. Vahedi. "Experimental Investigation and Regression Analysis on Plastic Deformation of Sandwich Panels made of Reinforced Polymeric Foam under Explosive Loading." *Modares Mechanical Engineering* 20, no. 11(2020): 2671-2678.
- [25] E. Avazpoor and A. H. Kazemian and H. Rahmani. "Numerical and experimental investigations on the low velocity impact properties of glass fiber reinforced epoxy composites: effects of radius of curvature." *Fibers and Polymers* 24, no. 9 (2023): 3289-3298.
- [26] A. Amirian and H. Rahmani and H. Moeinkhah. "An experimental and numerical study of epoxy-based Kevlar-basalt hybrid composites under high velocity impact." *Journal of Industrial Textiles*, 51 no. 1_suppl (2022): 804S-821S.
- [27] J. Mantari and A. Oktem and C.G. Soares. "A new higher order shear deformation theory for sandwich and composite laminated plates." *Composites Part B: Engineering* 43, no. 3 (2012): 1489-1499.
- [28] G. Milad. "An analytical and experimental investigation on corrugated plate modeling with homogenization method." (2017).
- [29] K.G. McConnell. "Vibration testing: theory and practice." *John Wiley & Sons* (1995).
- [30] J.E. Mottershead and M. Link and M.I. Friswell. "The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial." *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, no. 7 (2011): 2275-2296.