

طراحی و تحلیل ساختار نوین فراماده سلولی مکعبی سه بعدی به منظور کاهش ارتعاشات

امیرعباس خلیلی یزدی^۱، نیلوفر رضایی نیا^۱، مرتضی کارآموز مهدی آبادی^{۲*}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم و فناوری های بین رشته ای، ۱۱۱-۱۴۱۱۵، دانشجوی کارشناسی ارشد.

^۲ ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مکانیک، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، دانشجوی کارشناسی ارشد.

ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مکانیک، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، استاد راهنما.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: karamooz@modares.ac.ir

چکیده

کاهش ارتعاشات همواره یکی از چالش های اساسی در صنایع مختلف به شمار می رود و موجب شده است که توسعه ی مواد مهندسی پیشرفته و طراحی فرامواد نوین با ساختارهای ویژه بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، دو فراماده مکعبی سه بعدی جدید با هدف بهبود عملکرد در کاهش ارتعاشات و گسترش پهنای باندگپ فرکانسی معرفی و بررسی شده اند. برای تحلیل رفتار دینامیکی این ساختارها، مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی^۱ بر پایه ی روش تحلیل اجزای محدود انجام گرفته است. در این شبیه سازی، پاسخ فرکانسی دو فراماده مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل با ساختارهای سلولی مشابه در مطالعات پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که فرامواد پیشنهادی در مقایسه با نمونه های موجود، باندگپ وسیع تر و موثرتری ایجاد می کنند و در کاهش شدت ارتعاشات عملکرد بهتری دارند. به طور کلی، یافته های این پژوهش نشان می دهد که این ساختارهای شبکه ای پیشنهادی می توانند به عنوان گزینه ای موثر و قابل اعتماد برای طراحی مواد چندمنظوره با کارایی بالا در کاهش اغتشاش های مکانیکی و کنترل ارتعاشات مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی: فراماده؛ کاهش ارتعاشات؛ باندگپ؛ ساختار سلولی.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، ساختارهای سلولی به عنوان یکی از حوزه های نوآورانه و مهم مهندسی، توجه گسترده ای را به خود جلب کرده اند. این ساختارها با بهره گیری از هندسه های تکرارشونده در مقیاس میکرومتر تا میلی متر، امکان ایجاد تعادل میان وزن کم و مقاومت مکانیکی بالا را فراهم می کنند و در صنایع متنوعی مانند مکانیک، هوافضا، مهندسی پزشکی، عمران و طراحی سازه های

^۱ COMSOL Multiphysics

سبک‌وزن به کار گرفته شده‌اند. با ظهور فناوری‌های ساخت مدرن و سریع‌تر، کاربرد این ساختارها روزبه‌روز گسترده‌تر شده و امکان تولید هندسه‌های پیچیده را فراهم آورده است، که بر محدودیت‌های سنتی غلبه می‌کند.

در این راستا، توسعه‌ی فرامواد^۱ به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین رویکردها در مهندسی مواد و سازه‌ها مطرح شده است. این مواد مصنوعی، با بهره‌گیری از هندسه و چیدمان ساختاری منظم، قادر به ارائه خواصی هستند که در مواد متداول مشاهده نمی‌شود؛ از جمله کنترل انتشار امواج، جذب انرژی، تضعیف ارتعاش و تنظیم خواص حرارتی به صورت هم‌زمان [۱]. میان انواع مختلف فرامواد، ساختارهای شبکه‌ای سه‌بعدی به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، قابلیت تولید با فناوری چاپ سه‌بعدی و امکان تنظیم هندسی گسترده، گزینه‌ای ایده‌آل برای توسعه‌ی سازه‌های چندکاره به شمار می‌روند [۲]. دستیابی به ویژگی‌های دوگانه مانند جذب انرژی و کاهش ارتعاش معمولاً نیازمند مصالح و طراحی‌های پیچیده است، اما مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی هندسه‌ی سلول واحد در ساختارهای شبکه‌ای، می‌توان هر دو عملکرد را در یک ساختار سبک و کارآمد ادغام کرد [۳].

بررسی تحقیقات پیشین نیز بر پتانسیل بالای این ساختارها تأکید دارد. برای نمونه، پژوهشی یک فراماده شبکه‌ای سه‌بعدی با قابلیت جذب انرژی و کاهش ارتعاش هم‌زمان معرفی کرده که با تنظیم پارامترهای هندسی و چگالی نسبی، باندگپ ارتعاشی در محدوده فرکانسی پایین ایجاد می‌کند و عملکرد جذب انرژی را بهینه می‌سازد. این یافته‌ها، ظرفیت بالای ساختارهای شبکه‌ای را برای کاربرد در سازه‌های پیشرفته با کارایی چندمنظوره برجسته می‌سازد [۴]. علاوه بر این، سه مطالعه‌ی مستقل رویکردهای متفاوتی برای کاهش ارتعاشات در فرکانس‌های پایین و متوسط ارائه داده‌اند. در مطالعه‌ی اول، یک ساختار ترکیبی جدید بر پایه رزونانس محلی و طراحی تو در تو معرفی شد که ارتعاشات را کاهش می‌دهد و خواص مکانیکی بالا را حفظ می‌کند [۵]. مطالعه‌ی دوم، بر طراحی پل ساندویچی با هسته شبکه‌ای تمرکز داشت تا کاهش ارتعاش در بازه‌ی وسیع فرکانسی بهبود یابد [۶]. در نهایت، مطالعه‌ی سوم، شفتی با ساختار شبکه‌ای و نسبت پواسون پایین را پیشنهاد داد تا ارتعاشات پیچشی کاهش یابد؛ این تحقیق از مدل همگن‌شده برای ساده‌سازی تحلیل، محاسبه‌ی خواص مکانیکی موثر از طریق همگن‌سازی مجانبی و تحلیل مودال بهره برده است [۷].

در این پژوهش، با الهام از این پیشرفت‌ها، دو ساختار شبکه‌ای جدید معرفی شده است که در فرکانس‌های پایین، باندگپ‌های وسیع و موثری ایجاد می‌کنند. عملکرد این ساختارها در کاهش ارتعاشات با تحلیل عددی تأیید شده و در مجموع رویکرد پیشنهادی زمینه را برای پیاده‌سازی سازه‌هایی با طراحی هوشمند در حوزه‌هایی نظیر کاهش ارتعاشات تجهیزات صنعتی، بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل، و ایزولاسیون لرزه‌ای فراهم می‌سازد.

۲- شرح مسئله

در این پژوهش، در گام نخست به بررسی یکی از مقالات پیشین [۴] پرداخته شد، که در آن ساختار سلولی سه‌بعدی از جنس پلی‌یورتان ترموپلاستیک^۲ (TPU) و با هندسه‌ی مکعبی مورد مطالعه قرار گرفته بود. در آن تحقیق، نمودار پراکندگی امواج^۳ و همچنین نمودار عبور امواج^۴ برای ساختار ارائه شده ترسیم شده و نتایج نشان داده بود که این ساختار دارای یک باندگپ فرکانسی قابل توجه در بازه‌ی حدود ۶۰۰ تا ۷۲۰ هرتز است. در ادامه، برای اطمینان از درستی روش مدل‌سازی، ابتدا همان ساختار مرجع با استفاده از نرم‌افزار بازطراحی و شبیه‌سازی شد. با تطبیق نتایج حاصل با داده‌های مقاله‌ی اصلی و اطمینان از صحت فرایند مدل‌سازی، روند توسعه‌ی ساختارهای پیشنهادی آغاز گردید.

در مرحله‌ی بعد، دو ساختار جدید معرفی شد که از لحاظ هندسی شباهت‌های قابل توجهی به ساختار مرجع داشتند، اما هدف از طراحی آن‌ها مقایسه‌ی رفتار دینامیکی نه تنها میان این دو ساختار، بلکه بین هر یک از آن‌ها و ساختار اصلی بود. برای این منظور، سلول واحد هر ساختار در محیط نرم‌افزار ساخته شد و سپس با آرایش سه‌بعدی $5 \times 3 \times 3$ گسترش یافت تا تأثیرات مرزی و برهم‌کنش میان سلول‌ها نیز در تحلیل لحاظ شود.

^۱ Metamaterials

^۲ Thermoplastic Polyurethane

^۳ Dispersion Diagram

^۴ Transmission Diagram

پس از ساخت مدل‌ها، نمودارهای پراکندگی امواج برای محدوده‌ی فرکانسی مشابه ساختار مرجع به‌دست آمد. نتایج اولیه نشان داد که ساختارهای پیشنهادی دارای باندگپ‌های فرکانسی گسترده‌تر و منظم‌تر نسبت به نمونه‌ی اولیه هستند. برای تأیید نتایج حاصل از تحلیل پراکندگی، از نمودار عبور امواج استفاده شد. در واقع، زمانی که در نمودار پراکندگی یک ناحیه‌ی باندگپ دیده می‌شود، انتظار می‌رود در همان بازه‌ی فرکانسی، نمودار عبور امواج کاهش قابل توجهی در میزان عبور نشان دهد. به عبارت دیگر، ناحیه‌ی باندگپ در نمودار پراکندگی باید با ناحیه‌ی افت انرژی در نمودار عبور متناظر باشد؛ این هم‌پوشانی تأییدی بر درستی نتایج شبیه‌سازی و وجود واقعی باندگپ در ساختار است.

در نهایت، تمامی داده‌ها و نمودارهای به‌دست‌آمده از ساختارهای پیشنهادی با نتایج ساختار مرجع مقایسه شد و یافته‌ها در بخش‌های بعدی به تفصیل مورد تحلیل و بحث قرار می‌گیرند.

۳- مبانی نظری تحلیل انتشار موج در ساختارهای سلولی (فضای معکوس، ناحیه‌ی بریلوئین و نقاط تقارن)

- در تحلیل رفتار موجی مواد سلولی، یکی از مفاهیم کلیدی، ناحیه‌ی معکوس^۱ است. این ناحیه در واقع یک فضای ریاضی است که در آن به‌جای مختصات مکانی (x, y, z) از مختصات عدد موجی یعنی (kx, ky, kz) استفاده می‌شود. هر یک از این مؤلفه‌ها بیانگر بردار موج در جهت‌های مختلف شبکه هستند و تعیین می‌کنند که موج چگونه در ساختار منتشر می‌شود.
- در این فضا، هر سلول از شبکه‌ی واقعی، معادلی به نام ناحیه‌ی بریلوئین^۲ دارد که محدوده‌ی اصلی انتشار موج در ساختار را نشان می‌دهد. این ناحیه، در حقیقت «ابتدایی‌ترین» بخش فضای معکوس است که تمام ویژگی‌های انتشار امواج در شبکه را در خود دارد. با بررسی امواج در این ناحیه، می‌توان رفتار دینامیکی کل ساختار را پیش‌بینی کرد.
- انتشار موج در ساختار معمولاً در امتداد مسیرهایی میان نقاط تقارن ویژه در ناحیه‌ی بریلوئین بررسی می‌شود؛ برای مثال نقاطی مانند Γ, X, M و R که هرکدام جهت خاصی از انتشار موج در ساختار سه‌بعدی را نشان می‌دهند. حرکت موج از یک نقطه‌ی تقارن به نقطه‌ی دیگر، بیانگر تغییر در پاسخ دینامیکی ساختار است.
- به‌طور خلاصه، با محاسبه‌ی رابطه‌ی فرکانس- بردار موج (نمودار پراکندگی) در مسیر بین این نقاط تقارن، می‌توان فهمید که در چه فرکانس‌هایی موج در ساختار منتشر می‌شود و در چه بازه‌هایی انتشار آن متوقف می‌گردد (یعنی باندگپ ایجاد می‌شود). این تحلیل اساس کار در شناسایی رفتار ارتعاشی و طراحی ساختارهای دارای خاصیت مهار امواج است.

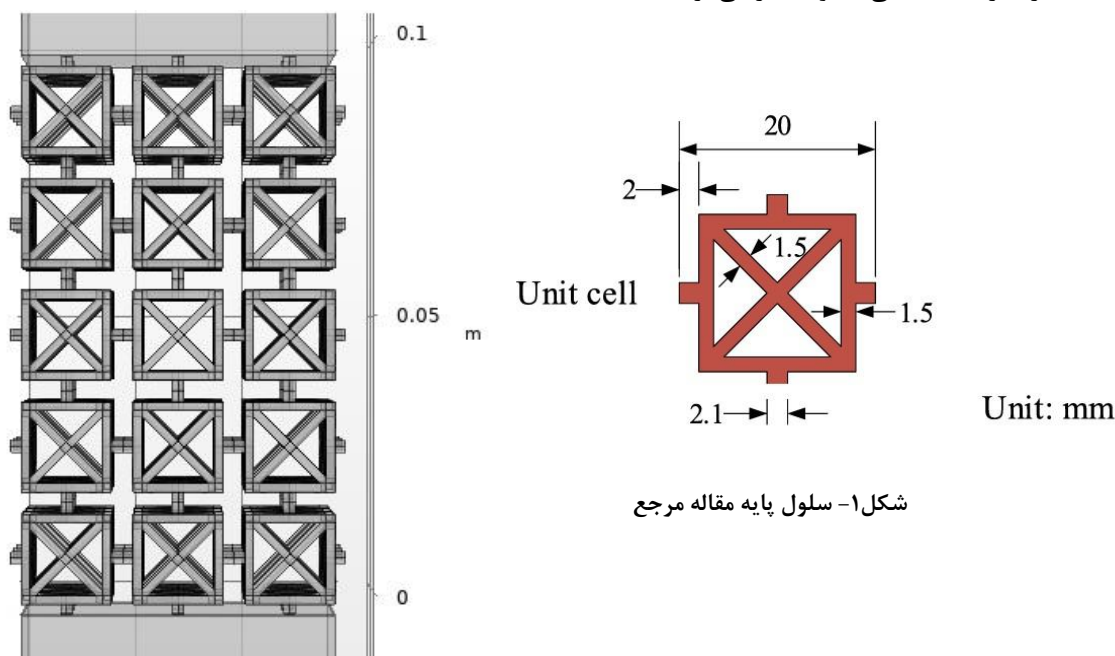
۴- مشخصات مکانیکی سلول و ابعاد ساختار

ساختار مورد مطالعه در این پژوهش بر پایه‌ی یک فریم مکعبی ساده طراحی شده است. در ساختار مرجع، اعضای قطری هر وجه به‌صورت مستقیم و صاف در نظر گرفته شده بودند، اما در ساختار پیشنهادی نخست، به‌منظور بهبود رفتار دینامیکی و ارتعاشی، این اعضا با منحنی‌هایی بر اساس تابع سینوسی جایگزین شده‌اند. استفاده از هندسه‌ی سینوسی به جای المان‌های مستقیم، موجب افزایش انعطاف‌پذیری موضعی و در نتیجه تغییر در مسیر انتقال موج درون ساختار می‌شود؛ این ویژگی می‌تواند به شکل‌گیری باندگپ‌های گسترده‌تر یا جابه‌جایی فرکانسی آن‌ها منجر شود.

^۱ Reciprocal Space

^۲ Brillouin Zone

در ساختار دوم پیشنهادی، هندسه تا حدی مشابه نمونه‌ی اول است، با این تفاوت که در هر وجه به جای منحنی سینوسی، از دو نیم‌دایره متقارن همراه با یک میله‌ی خطی در مرکز وجه استفاده شده است. وجود این المان میانی علاوه بر افزایش پایداری مکانیکی ساختار، باعث می‌شود تا مسیرهای انتقال نیرو و موج درون سلول به تعادل بیشتری برسند؛ در نتیجه، رفتار ارتعاشی ساختار نسبت به بارگذاری دینامیکی یکنواخت‌تر می‌گردد.



شکل ۱- سلول پایه مقاله مرجع

شکل ۲- شبکه سه‌بعدی سلول مرجع (متر)

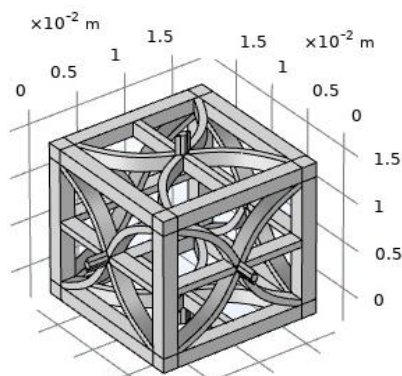
ابعاد سلول واحد برای هر دو ساختار برابر با طول پشت تا پشت ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و ضخامت اعضای شبکه ۱.۵ میلی‌متر است. جنس مصالح مورد استفاده پلی‌یورتان ترموپلاستیک (TPU) انتخاب شده که دارای ویژگی‌های زیر است:

• چگالی: ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

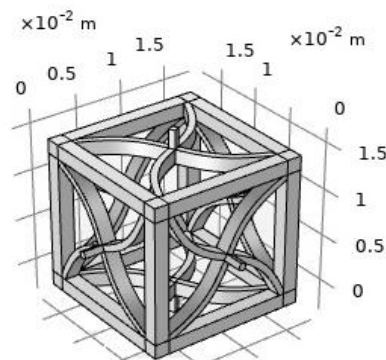
• مدول یانگ: ۶۱ مگاپاسکال

• ضریب پواسون: ۰.۴۷

انتخاب این ماده به دلیل توانایی بالای آن در تحمل کرنش‌های بزرگ و برگشت‌پذیر صورت گرفته است. این خاصیت، آن را برای استفاده در ساختارهای سلولی و جذب‌کننده‌ی انرژی که تحت بارهای دینامیکی یا ارتعاشی قرار می‌گیرند، مناسب می‌سازد. در نتیجه، ساختار نهایی می‌تواند ضمن حفظ پایداری مکانیکی، در برابر ارتعاشات و تغییرشکل‌های متناوب عملکرد موثری داشته باشد.



شکل ۴- سلول پایه ب (دو نیم دایره و خط)



شکل ۳- سلول پایه الف (سینوسی)

۵- مدل سازی و گرفتن نمودارهای موردنظر در نرم‌افزار

برای شبیه‌سازی ساختارهای سلولی در نرم‌افزار، ابتدا تمامی پارامترهای هندسی و مشخصات مکانیکی ماده به صورت پارامتریک تعریف شد؛ طول سلول‌ها، ضخامت اعضا و خواص ماده (چگالی، مدول یانگ و ضریب پواسون) وارد نرم‌افزار شد تا مدل انعطاف‌پذیری کافی برای تغییر ابعاد و اصلاح هندسه در مراحل بعدی داشته باشد. این رویکرد پارامتریک امکان تغییر سریع هندسه و تکرار شبیه‌سازی برای ساختارهای پیشنهادی را فراهم می‌کند.

در مرحله‌ی بعد، ساختار ابتدا در یک وجه به صورت دو بعدی ساخته شد تا فرآیند طراحی و هندسه منحنی‌های سینوسی یا نیم‌دایره‌ای اعضای وجه به دقت کنترل شود. پس از اطمینان از صحت طراحی، مدل به صورت سه بعدی گسترش یافت تا تعامل میان سلول‌ها و اثرات مرزی در کل شبکه بررسی شود. برای مدل‌سازی انتشار موج در ساختارهای تکرارشونده، شرایط مرزی تکراری^۱ اعمال شد، به طوری که سلول واحد بتواند رفتار کل شبکه‌ی نامحدود را به صورت تقریبی شبیه‌سازی کند.

گام بعدی شامل تعریف بردارهای موج در فضای سه‌بعدی معکوس (kx, ky, kz) و مشخص کردن مسیر حرکت موج میان نقاط تقارن ناحیه‌ی بریلوین بود تا تحلیل پراکندگی و شناسایی باندگپ‌ها ممکن شود. مش‌بندی مدل در حالت بسیار ریز^۲ انجام شد تا دقت حل بالاتر برود و نتایج پراکندگی دقیق باشند. در نهایت، نمودار پراکندگی برای ۱۰ فرکانس ویژه اول محاسبه شد و مراحل حل به صورت ۵۰ تایی انجام گرفت تا پاسخ دینامیکی ساختار به شکل گام‌به‌گام و کامل ثبت شود. این فرآیند، پایه‌ای برای بررسی و مقایسه عملکرد دینامیکی ساختارهای پیشنهادی و ساختار مرجع فراهم می‌آورد.

پس از اتمام شبیه‌سازی سلول واحد و اطمینان از صحت نتایج، سلول‌ها در نرم‌افزار تکرار شدند تا یک شبکه‌ی سه‌بعدی $5 \times 3 \times 3$ در راستای طول ایجاد شود. این کار امکان بررسی اثرات مرزی و تعامل میان سلول‌ها را فراهم می‌کند و رفتار دینامیکی کل ساختار را نزدیک به حالت واقعی شبیه‌سازی می‌نماید.

برای جلوگیری از انعکاس غیرواقعی موج در انتهای ساختار، یک لایه‌ی مرزی جذبی^۳ PML در انتهای شبکه اعمال شد. این لایه همانند یک «محیط جذب‌کننده» عمل می‌کند و موجی که به انتهای ساختار می‌رسد را جذب می‌کند تا از برگشت آن به داخل شبکه جلوگیری شود، و بنابراین نتایج مربوط به انتشار موج و نمودار عبور، واقعی و معتبر باقی بمانند.

سپس بار اولیه به ساختار وارد شد و در ابتدا و انتهای شبکه از حسگر مرزی^۴ استفاده شد تا نسبت انرژی یا سیگنال خروجی به ورودی اندازه‌گیری شود. در نهایت، نمودار پراکندگی امواج برای بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۲۰۰ هرتز با مراحل ۱۰ تایی محاسبه شد. این تحلیل امکان مشاهده باندگپ‌ها و تأیید رفتار دینامیکی پیش‌بینی شده را برای کل ساختار فراهم می‌آورد و پایه‌ای برای مقایسه ساختارهای پیشنهادی با نمونه‌ی مرجع فراهم می‌کند.

۶- نتایج تحلیل

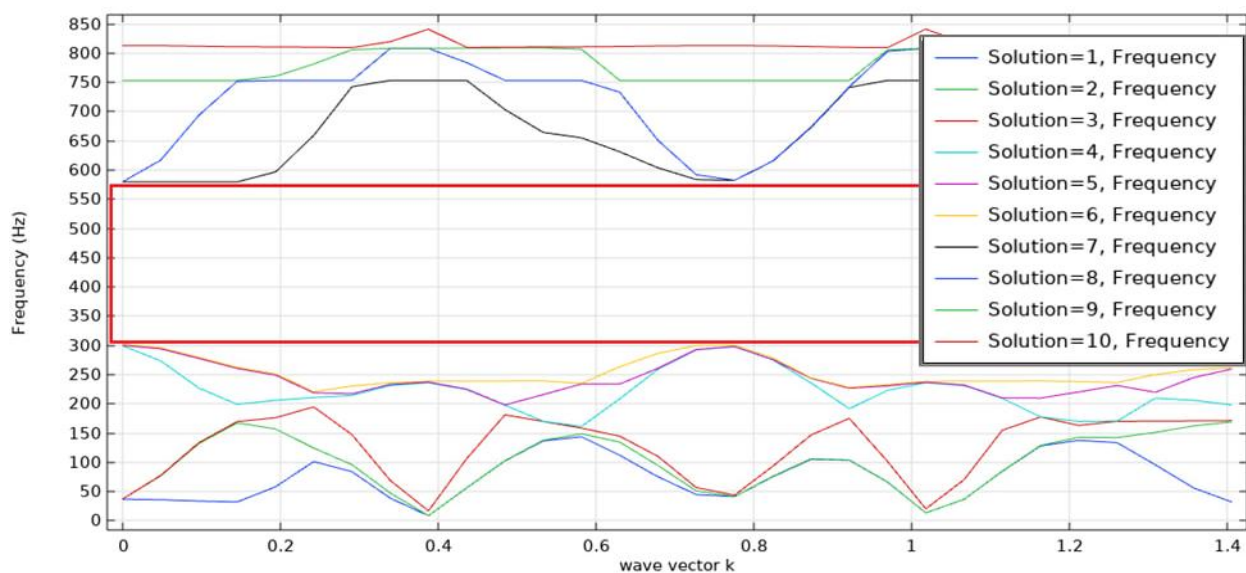
نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که باندگپ در هر دو ساختار پیشنهادی نسبت به ساختار مرجع پهن‌تر شده است و در این بازه‌های فرکانسی، انتشار امواج درون شبکه متوقف می‌شود. این موضوع تأییدی بر بهبود عملکرد ساختارهای جدید در مهار و کنترل انتقال موج است.

^۱ Periodic Condition

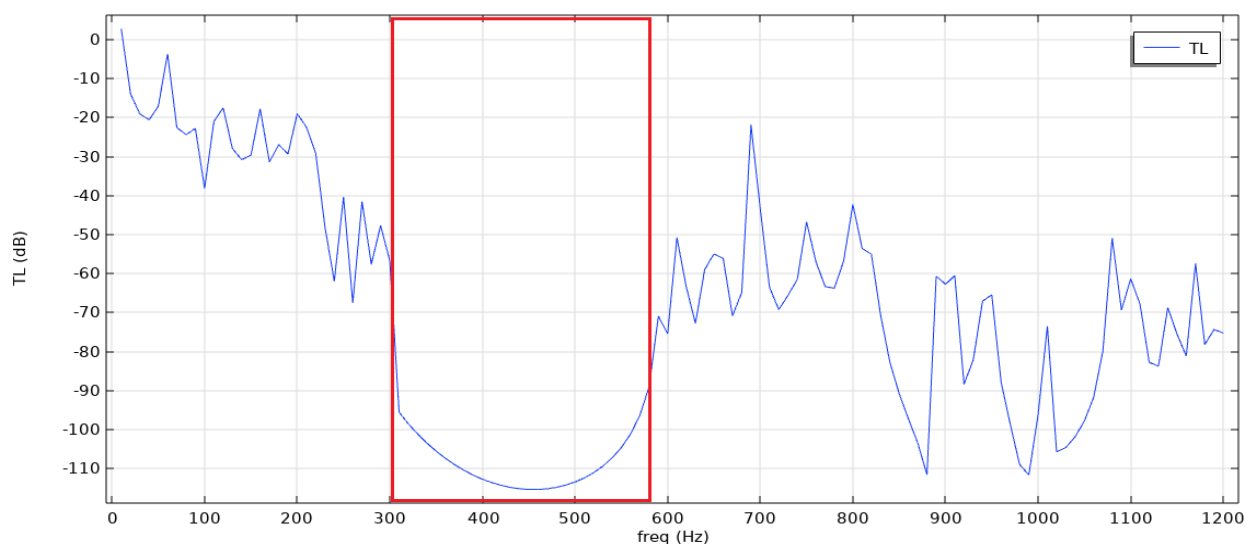
^۲ Extremely Fine

^۳ Perfectly Matched Layer

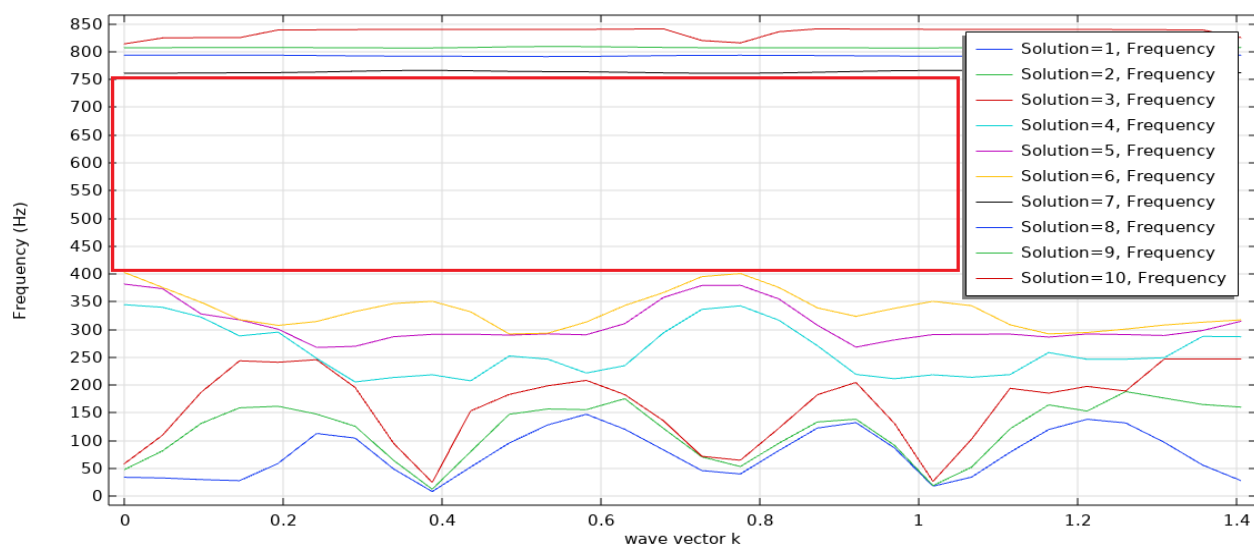
^۴ boundary prob



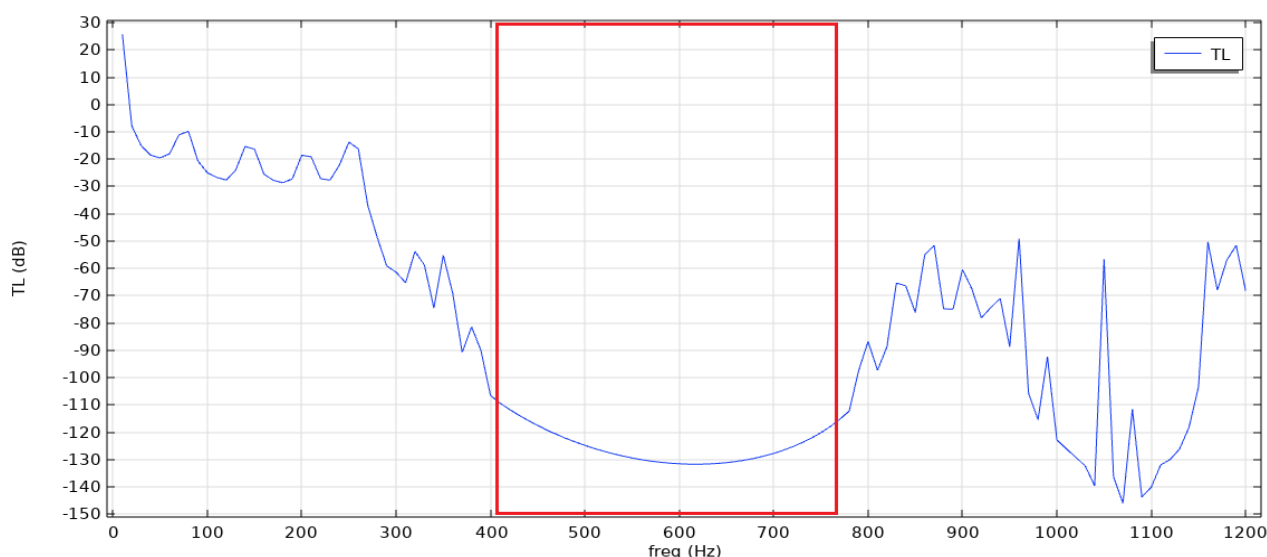
شکل ۵- نمودار پراکندگی امواج در سلول الف (سینوسی)



شکل ۶- نمودار انتقال امواج در سلول الف (سینوسی)



شکل ۷- نمودار پراکندگی امواج در سلول ب (دونیم دایره و خط)



شکل ۸- نمودار انتقال امواج در سلول ب (دو نیم دایره و خط)

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تغییر در هندسه تاثیر چشمگیری بر عملکرد دینامیکی ساختار دارد. ساختار الف با قطرهای سینوسی توانست باندگپی در محدوده ۳۰۰ تا ۵۵۰ هرتز ایجاد کند، در حالی که ساختار ب با ترکیب دو نیم‌دایره و یک بخش خطی، باندگپی از ۴۰۰ تا ۷۵۰ هرتز را به دست آورد. این بهبود در محدوده فرکانسی، در حالی حاصل شد که تغییر در چگالی سازه بسیار ناچیز بود، که نشان می‌دهد کنترل هندسه به‌تنهایی می‌تواند عامل موثری در تنظیم رفتار ارتعاشی شبکه‌ها باشد.

افزایش بازه باندگپ را می‌توان به ترکیب اثرات رزونانس محلی و پدیده‌های پراکندگی موج نسبت داد، زیرا شکل‌های منحنی و ترکیبی موجب تقویت بازتاب و تداخل سازنده بین امواج درون ساختار می‌شوند. در واقع، طراحی هندسی غیرخطی مسیر حرکت موج را پیچیده‌تر کرده و با افزایش طول مسیر و نقاط بازتاب، منجر به افت موثر انرژی ارتعاشی می‌شود. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی هوشمندانه هندسه بدون نیاز به افزایش جرم، می‌توان عملکرد ارتعاشی و جذب انرژی مواد شبکه‌ای را به طور قابل توجهی ارتقا داد؛ این ویژگی‌ها امکان استفاده از این مواد در کاربردهای عملی مانند کاهش ارتعاشات تجهیزات صنعتی، سازه‌های حمل‌ونقل، و ایزولاسیون لرزه‌ای را فراهم می‌کند. در جدول زیر خلاصه نتایج بدست آمده گردآوری شده‌است:

جدول ۱- مقایسه مقادیر بدست آمده از سه سلول

پارامتر	ساختار الف (سینوسی)	ساختار ب (نیم‌دایره و خط)	ساختار مقاله مرجع
کمینه فرکانس باندگپ	۳۰۰	۴۰۰	۶۲۱
بیشینه فرکانس باندگپ	۵۵۰	۷۵۰	۷۳۲
پهنای باندگپ	۲۵۰	۳۵۰	۱۱۱
بیشینه کاهش مقدار ورودی در نمودار انتقال (dB)	-۱۱۵	-۱۳۰	-۸۰
چگالی سلول نسبت به ساختار مرجع	۳-۵ درصد بیشتر	۵-۱۰ درصد بیشتر	-

مراجع

1. Liu, Zhengyou, et al. "Locally resonant sonic materials." *science* 289.5485 (2000): 1734-1736.
2. D'Alessandro, Luca, et al. "Modeling and experimental verification of an ultra-wide bandgap in 3D phononic crystal." *Applied Physics Letters* (2016): 109.22.
3. Zhang, Xing, et al. "Design optimization of multifunctional metamaterials with tunable thermal expansion and phononic bandgap." *Materials & Design* 209 (2021): 109990.
4. Jiang, Weifeng, et al. "Multifunctional 3D lattice metamaterials for vibration mitigation and energy absorption." *International Journal of Mechanical Sciences* 233 (2022): 107678.
5. Li, Lingbo, et al. "Mechanisms of low-frequency bandgap formation and energy absorption of three-dimensional nested hybrid lattice structures." *Composites Part B: Engineering* 291 (2025): 112045.
6. Xiao, Lei, et al. "Broadband and robust vibration reduction in lattice-core sandwich beam with 3D-printed QZS resonators." *Composite Structures* 352 (2025): 118626.
7. Wu, Yangjun, et al. "Metamaterial shaft with a low Poisson's ratio lattice structure for torsional vibration isolation." *Mechanical Systems and Signal Processing* 228 (2025): 112454.