

مطالعه پارامتری کنترل ارتعاشات در ساختار مشبک الهام گرفته از برگ گل

ایوب مرادی^ا، مرتضی کارآموز مهدی آبادی^ب

^ا ایران، تهران، جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۱۵-۱۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^ب ایران، تهران، جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۴۱۵-۱۱۱، استادیار

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

چکیده

در این مقاله، یک ساختار مشبک الهام گرفته از طبیعت در نظر گرفته شده است و وضعیت ارتعاشی آن بررسی شده است. در گام اول ابتدا نمودارهای پراکندگی در باند فرکانسی ۰ تا ۵۰۰۰ انجام شده و مطالعه عددی نیز انجام شده است و مشخص شده است که بیشتر از ۵۰ درصد ایزولاسیون فرکانسی در ساختار تا فرکانس ۵ کیلوهرتز ایجاد می شود. بهینه سازی و تحلیل سازه های شبکه ای و فرامواد با هدف ایزولاسیون و کنترل ارتعاش مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه مطالعه پارامتری بر روی سازه با ضخامت های ۱.۲۵ و ۱.۵ و ۱.۷۵ میلیمتر انجام شده است که نشان می دهد تغییر ضخامت باعث تغییر در مجموع گپ فرکانسی می شود به طوری که هرچه ضخامت کمتر باشد مجموع گپ فرکانسی بیشتری در سازه ایجاد می شود. نوآوری های پژوهش های اخیر بر استفاده از تکرار هندسی، تغییرات پارامتری ساختار، رزوناتورهای الحاقی، و فرمول بندی های عددی پیشرفته تأکید دارد که سبب ارتقای کارایی سازه ها در حذف و کاهش انرژی ارتعاشی بدون افزایش وزن و صرفه جویی در زمان محاسباتی می شوند. در نهایت، چشم انداز استفاده صنعتی از این ساختارها برای ایزولاسیون ارتعاش، کاهش نویز، ساخت ابزارهای صوتی سبک و لنزهای صوتی فراوضوح ارائه شده و مسیرهای آینده در توسعه متامتریال ها و سازه های مهندسی نوین ترسیم شده است.

کلمات کلیدی: ساختارهای مشبک؛ گپ فرکانسی؛ ایزولاسیون فرکانسی؛ مطالعه پارامتری.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، مواد متامتریال صوتی وارد عرصه تحقیقات شده اند که با برخورداری از ویژگی های فیزیکی ممتاز، محدودیت های مواد سنتی را پشت سر گذاشته اند. با تغییر ابعاد و هندسه دقیق این مواد، خواص منحصر به فردی نظیر فیلترسازی

امواج، هدایت امواج، شکست منفی، پنهان‌سازی صوتی و متمرکزسازی انرژی صوتی حاصل می‌شود؛ بدین ترتیب، مواد متامتریال صوتی طیف وسیعی از کاربردها را در اختیار قرار داده‌اند و توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده‌اند.

امواج صوتی در زندگی روزمره نقش مهمی ایفا می‌کنند؛ ضمن تسهیل انتقال اطلاعات، گاهی اوقات نویز موجب اختلال در زندگی عادی انسان می‌شود. لذا شناسایی کریستال‌های فونونیک با قابلیت مناسب کاهش ارتعاش و نویز از منظر رفاه انسانی بسیار حائز اهمیت است.

در صورتی که یک کریستال فونونیک در یک بازه فرکانسی منحنی پخش امواج نداشته باشد، آن محدوده را نوار ممنوعه می‌نامند و در سایر محدوده‌های فرکانسی با وجود منحنی پخش، نوار عبوری نامیده می‌شود. بنابراین، عرض نوار ممنوعه و مقدار آغازین فرکانسی آن تا حد زیادی بیانگر توانایی ساختار در تضعیف ارتعاش و صوت خواهد بود. این ویژگی، مبنایی نظری برای مطالعات کنترل ارتعاش و نویز به شمار می‌رود.

در مطالعات اولیه کریستال‌های فونونیک، زمانی که ابعاد ساختارهای دوره‌ای با طول‌موج‌های موج الاستیک هم‌مرتبه است، به دلیل تماس موج الاستیک با محیط ساختاری، پدیده پراکندگی و تداخل قوی رخ می‌دهد. امواج پراکنده شده متعدد یکدیگر را تضعیف می‌کنند و به باز شدن نوار ممنوعه منجر می‌گردد. این پدیده به اثر پراکندگی براگ معروف است. اما به علت ابعاد بزرگ ساختار، کنترل امواج الاستیک با فرکانس پایین و قدرت نفوذ زیاد غیرممکن بوده و عملاً کاربرد آن در مهندسی دشوار می‌شود. [۱]

عنایت‌جری و همکاران در مقاله «بررسی عددی و تجربی سازه‌های شبکه‌ای زیست‌الهام گرفته بر اساس گل‌های درخت کافور برای کاهش ارتعاشات» طراحی و بهینه‌سازی چهار نوع سلول واحد با الگوبرداری از گل‌های درخت کافور است که به کمک الگوریتم ژنتیک موفق شده‌اند پهنای باند توقف ارتعاش بسیار وسیعی را در سازه ایجاد کنند؛ این ساختارها نه تنها قابلیت استثنایی در حذف و کنترل ارتعاشات در محیط‌های مهندسی دارند، بلکه اعتبار نتایج عددی، به طور کامل توسط آزمایش‌های عملی تأیید شده است. تمرکز مقاله مذکور بر تلفیق روش‌های شبیه‌سازی عددی، آزمون تجربی و بهینه‌سازی است تا راهکاری هوشمندانه و نوآورانه برای ارتقای عملکرد سازه‌های متامتریال ارائه دهد و نقش طراحی الهام گرفته از طبیعت را در پیشرفت این حوزه عمیقاً برجسته کند. [۲]

وانگ و همکاران، با الهام از پنجره‌های سنتی چینی و الگوی کیریگامی، نوعی فراماده کشسان سلسله‌مراتبی را معرفی کرده‌اند که قادر است بدون افزایش جرم کلی سیستم، نوارهای توقف فرکانسی بسیار وسیع و موثری را در بازه زیرطولی موج ایجاد کند. این نوآوری با بهره‌گیری از تکرار سلسله‌مراتبی واحدهای ساختاری و طراحی ترکیبی، امکان کنترل و ارتقای چشمگیر پهنای باند توقف ارتعاشات را فراهم ساخته است. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود و تحلیل عملکرد تجربی نشان داده است که تغییر نسبت و مرتبه سلسله‌مراتب ساختار تأثیر مستقیمی بر مکانیسم و وسعت نوار توقف دارد و می‌تواند منجر به بهینه‌سازی قابل توجه عملکرد ایزولاسیون ارتعاش بدون افزایش وزن شود. [۳]

لیو و همکاران در مقاله «شبکه لانه‌زنبوری ستاره‌ای چندگانه با ورودی مجدد و پارامترهای منفی دوگانه و خاصیت نوار توقف، یک ساختار لانه‌زنبوری ستاره‌ای با ورودی مجدد مبتنی بر ماده تک‌فاز ارائه کرده‌اند که قابلیت دستیابی به پهنای باند وسیع نوار توقف ارتعاش و خواص منفی دوگانه (چگالی جرم مؤثر منفی و مدول مؤثر منفی) را در فرکانس‌های پایین دارد. نوآوری اصلی این کار، طراحی هندسه سلول با قابلیت تنظیم زاویه‌های داخلی و تعداد ورودی‌های مجدد است که امکان کنترل دقیق پهنای نوار توقف و رفتار ارتعاشی را فراهم می‌کند. با شبیه‌سازی عددی، سه نوار توقف وسیع و خواص منفی دوگانه برای ساختار پیشنهادی مشخص شده است. این ساختارهای متامتریال سبک وزن، کاربردهای بسیار قابل توجهی در کنترل ارتعاش، کاهش نویز و تصویربرداری فراصوح دارند و به دلیل ساده بودن ساختار و استفاده از ماده تک‌فاز، قابلیت صنعتی‌سازی مناسبی دارند. [۴]

خواوله و همکاران یک چارچوب نوآورانه برای بهینه‌سازی ساختارهای شبکه‌ای چاپ‌پذیر با خواص دینامیکی خاص ارائه کرده‌اند. نوآوری اصلی این پژوهش در بهره‌گیری از روش انرژی مکمل در تعیین ماتریس‌های سختی و انعطاف‌پذیری سلول‌های واحد است که نیاز به مش‌بندی سنگین و تحلیل عددی اجزای محدود را حذف می‌کند و سرعت و دقت زیادی به فرآیند بهینه‌سازی می‌بخشد. با تنظیم هندسه سلول‌های شبکه‌ای به صورت پارامتری و انجام بهینه‌سازی توپولوژی، ساختار نهایی می‌تواند شکاف فرکانسی مطلوب و وسیعی در بازه فرکانسی طبیعی ایجاد کند؛ به طوری که افزایش متوسط ۲۵۰ درصدی در پهنای باند ارتعاش در ساختارهای مستطیلی و حلقوی دوبعدی گزارش شده است. [۵]

۲- هندسه ساختار و مطالعه عددی

در این مطالعه، ساختار مشبک دوبعدی جدیدی با الهام از شکل برگ گل لاله عباسی طراحی شده است. برگ این گیاه علاوه بر ویژگی‌های دارویی و ترکیبات شیمیایی منحصربه‌فرد که در مطالعات اخیر مورد تأیید قرار گرفته‌اند، تاکنون کمتر مورد توجه در حوزه کاربردهای مهندسی یا الهام‌گیری ساختاری قرار گرفته است. در این پژوهش، الگوهای هندسی برگ گل لاله عباسی با استفاده از تابع سینوسی در مدل‌سازی، پیاده‌سازی شده و موجب شکل‌گیری ساختاری شباهت‌یافته به برگ طبیعی گردیده است. این ساختار مشبک به صورت دوبعدی طراحی شده و ابعاد سلول واحد آن به گونه‌ای تعریف شده است که ضمن حفظ زیبایی‌شناسی طبیعی، قابلیت‌های عملکردی مانند کاهش ارتعاش، استحکام مکانیکی و پتانسیل کاربردی در حوزه‌های مهندسی را دارا باشد.

این طراحی، رویکردی نوین در استفاده از الگوهای زیستی برای توسعه مواد و سازه‌های مهندسی ارائه می‌دهد که علاوه بر ویژگی‌های زیست‌الهامی، می‌تواند منجر به ایجاد نوار ممنوعه در محدوده فرکانسی مطلوب، بهبود خواص ساختاری و افزایش کاربردپذیری در صنایع مختلف گردد. محاسبات هندسی و پارامتریک مبتنی بر تابع سینوسی، امکان بهینه‌سازی خواص فیزیکی و مکانیکی این ساختار را فراهم ساخته و مسیر جدیدی برای بهره‌برداری از الگوهای طبیعی در طراحی صنعتی پیش رو قرار می‌دهد.

برای تحلیل انتشار موج آزاد در شبکه لتیس بی‌نهایت، از نظریه الاستودینامیک و قضیه بلخ استفاده شده است. شکل ۱ سلول واحد و ناحیه بریلوئن را نشان می‌دهد. بردارهای پایه شبکه به صورت $e_1 = \bar{a}i$ و $e_2 = \bar{b}j$ معرفی شده‌اند، که بردارهای کارتزین متعامد را تشکیل می‌دهند. شبکه لتیس با انتقال سلول واحد در راستای بردارهای پایه (e_1, e_2) در فضای دوبعدی ایجاد می‌شود و این شبکه، فضای شبکه معکوس را تعریف می‌کند. بردارهای پایه شبکه مستقیم و معکوس مطابق رابطه

$$e_i \cdot e_j = 2\pi\delta_{ij} \quad (1)$$

تعریف شده‌اند. (که δ_{ij} تابع کرونکر است.) بنابراین بردارهای شبکه معکوس لتیس به صورت

$$\begin{aligned} e_1 &= (2\pi/a, 0) \\ e_2 &= (0, 2\pi/b) \end{aligned} \quad (2)$$

هستند. مطابق قضیه بلخ، بردار جابه‌جایی $u(r)$ وابسته به موقعیت فضایی r برای محیط دوره‌ای طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$u(r) = u_k(r)e^{i(k \cdot r)} \quad (3)$$

که در اینجا $r = (x, y)$ بردار موقعیت، $k = (k_x, k_y)$ بردار موج بلوخ دوبعدی، i عدد مختلط و u_k تابع برداری دوره‌ای است. معادله حاکم موج الاستیک به همراه شرایط مرزی، مسئله ویژه مقداری زیر را ارائه می‌کند:

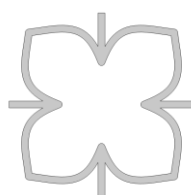
$$(K - \omega^2 M)U = 0 \quad (4)$$

که در آن K و M ماتریس‌های سختی و جرم و U بردار جابه‌جایی هستند.

برای شبیه‌سازی اجزاء محدود، از نرم‌افزار COMSOL با شرایط مرزی دوره‌ای Bloch-Floquet استفاده شده است. رابطه فوق (۱.۴) برای استخراج این شرایط و اعمال بر سلول واحد شکل (۱) استفاده شده است. شبکه فرضاً بی‌نهایت و در امتداد x کاملاً

دوره‌ای است، بنابراین مرزهای دوره‌ای بلوخ-فلوکه^۱ روی دو طرف محور X و مرزهای آزاد در جهت Y اعمال شده‌اند. منحنی‌های پراکندگی^۲ با جستجو روی بردار موج K در راستای مرزهای ناحیه بریلوئن اصلی محاسبه گردیده‌اند. [۶]

بر اساس یافته‌های سان و همکاران، گیاه لاله عباسی در مواجهه با آلودگی‌های گالاکسولید و میکروپلاستیک‌های پلی‌استایرن، توانست رشد سالم خود را حفظ کند؛ به‌طوری‌که طول و جرم اندام‌ها افزایش یافت و سطح برگ‌ها و ریزوم‌ها متناسب باقی ماند. در این شرایط، گیاه با فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله سوپراکسید دیسموتاز و کاهش مالون‌دی‌آلدئید، توانست استرس اکسیداتیو ناشی از آلاینده‌ها را کنترل کند و به تنظیم تعادل سلولی و کاهش سمیت مواد کمک کند. این نتایج نشان می‌دهد لاله عباسی ظرفیت بالایی برای اصلاح زیستی محیط‌های آلوده به این مواد دارد. [۷]



شکل ۱. سلول واحد ساختار پیشنهاد شده الهام گرفته از برگ گل لاله عباسی به صورت تابع سینوسی

در ادامه پارامترهای استفاده شده برای ماده و هندسه ساختار به صورت یکجا آورده شده است. این پارامترها در کامسول تعریف شده‌اند و به ماده و هندسه ساختار اختصاص داده شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در مدلسازی

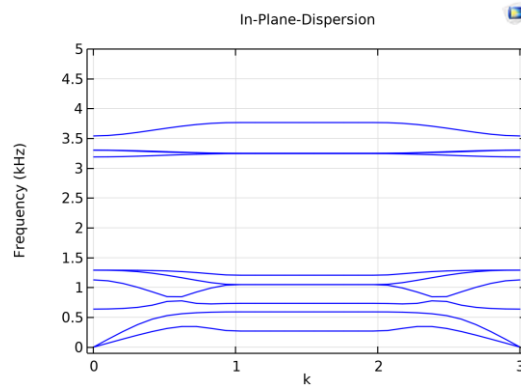
پارامتر	اندازه	واحد
ضخامت (t)	۱.۵	میلیمتر (mm)
ثابت شبکه (a)	۴۰	میلیمتر (mm)
مدول یانگ	۲.۱	گیگاپاسکال (GPa)
چگالی	۱۲۳۰	کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m ³)
ضریب پواسون	۰.۳۷	-

۱-۲ نمودار پراکندگی ساختار و تغییرات نوار ممنوعه

برای تحلیل میزان موج عبوری از ساختار، میتوان از نرم افزار کامسول مولتی فیزیک استفاده کرد. این نرم افزار تحلیل المان محدود را با مطالعات مختلف (فرکانس ویژه و محدوده فرکانسی و محدوده زمانی و...) انجام میدهد که با استفاده از مطالعه فرکانس ویژه میتوان معادله موج الاستیک در فضای دو بعدی و سه بعدی را حل کرد و در مرحله پس پردازش نرم افزار نمودار یک بعدی فرکانس‌های ویژه برای پاسخ خروجی را بدست آورد که همان نمودار پراکندگی است. نمودار پراکندگی موج عبوری از سازه را در فرکانس‌هایی که در آن مطالعه انجام گرفته است نشان می‌دهد که میتوان از آن برای سنجش میزان ایزوله کردن ارتعاشات در هر ساختاری استفاده کرد.

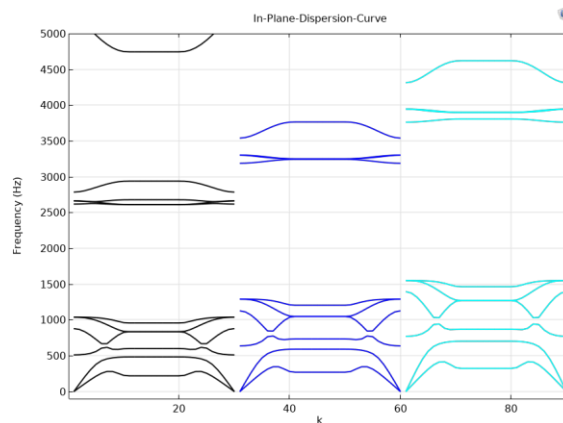
^۱ Bloch-Floquet periodic boundary condition

^۲ Dispersion Curve

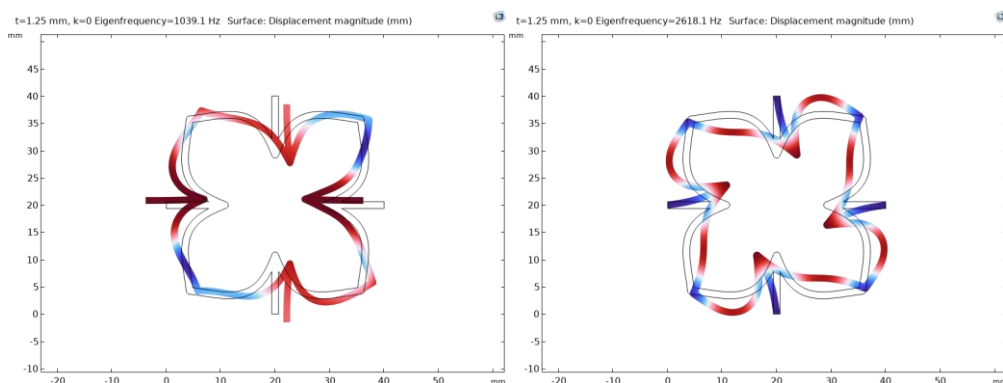


شکل ۲. نمودار پراکندگی در صفحه سلول برگ گل لاله عباسی برای ضخامت ۱.۵ میلیمتر

نمودار پراکندگی نشان دهنده عملکرد خوب سازه در فرکانس‌های ۱۳۰۰ تا حدود ۳۰۰ هرتز می‌باشد که عملکرد قابل توجهی است. در شکل (۳) با تغییر دادن ضخامت از سنجش نتایج بدست آمده اطمینان حاصل می‌شود و ضخامتی که بیشترین باندگپ را دارد ۱.۵ میلیمتر است. و در شکل (۴) شکل مد سازه در فرکانس‌های باز شدن و بسته شدن نوار ممنوعه برای ضخامت ۱.۲۵ میلیمتر مشاهده می‌شود.

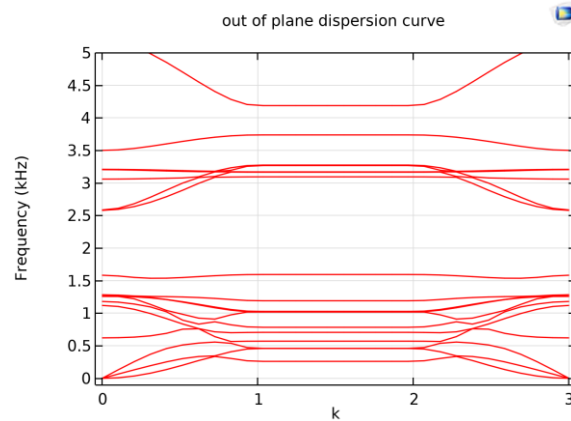


شکل ۳. مطالعه پارامتری نمودار پراکندگی داخل صفحه با ضخامت‌های ۱.۲۵ و ۱.۵ و ۱.۷۵ میلیمتر

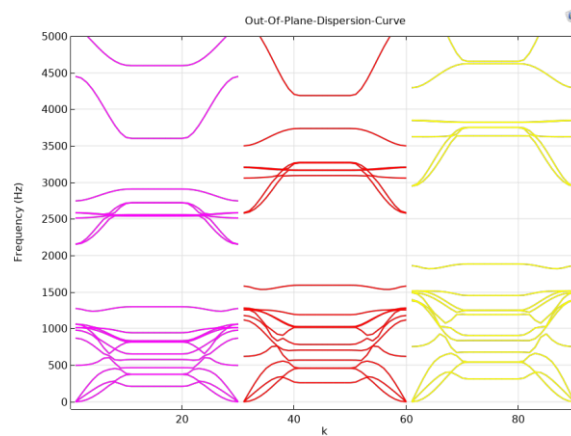


شکل ۴. شکل مدهای سازه داخل صفحه ضخامت ۱.۲۵ میلیمتر در فرکانس ۱۰۳۹ هرتز و ۲۶۱۸ هرتز نوار ممنوعه

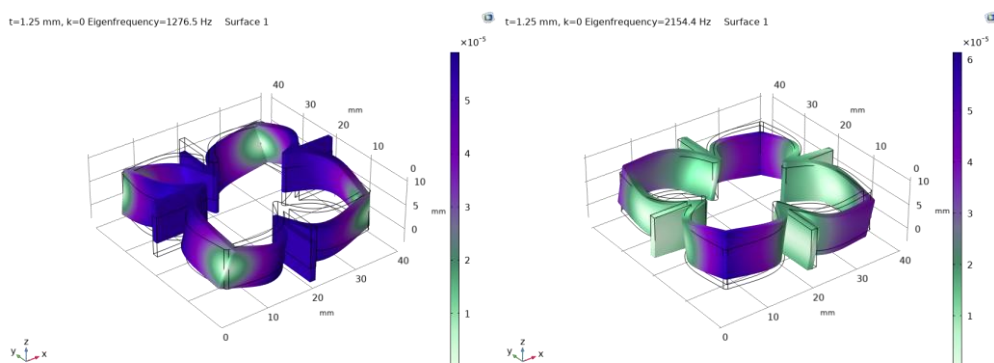
در شکل (۵) نمودار پراکندگی برای سازه در حالت خارج از صفحه رسم شده است که در این حالت نیز از فرکانس حدود ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ نوار ممنوعه فرکانسی مشاهده می‌شود. و همچنین به طور مشابه در شکل (۶) برای خارج از صفحه مطالعه پارامتری شده با تغییرات ضخامت از ۱.۲۵ تا ۱.۷۵ میلیمتر با گام ۰.۲۵ انجام شده است.



شکل ۵. نمودار پراکندگی خارج از صفحه سلول برگ گل لاله عباسی برای ضخامت ۱.۵ میلیمتر



شکل ۶. مطالعه پارامتری نمودار پراکندگی سلول خارج از صفحه با ضخامت‌های ۱.۲۵ و ۱.۵ و ۱.۷۵ میلیمتر



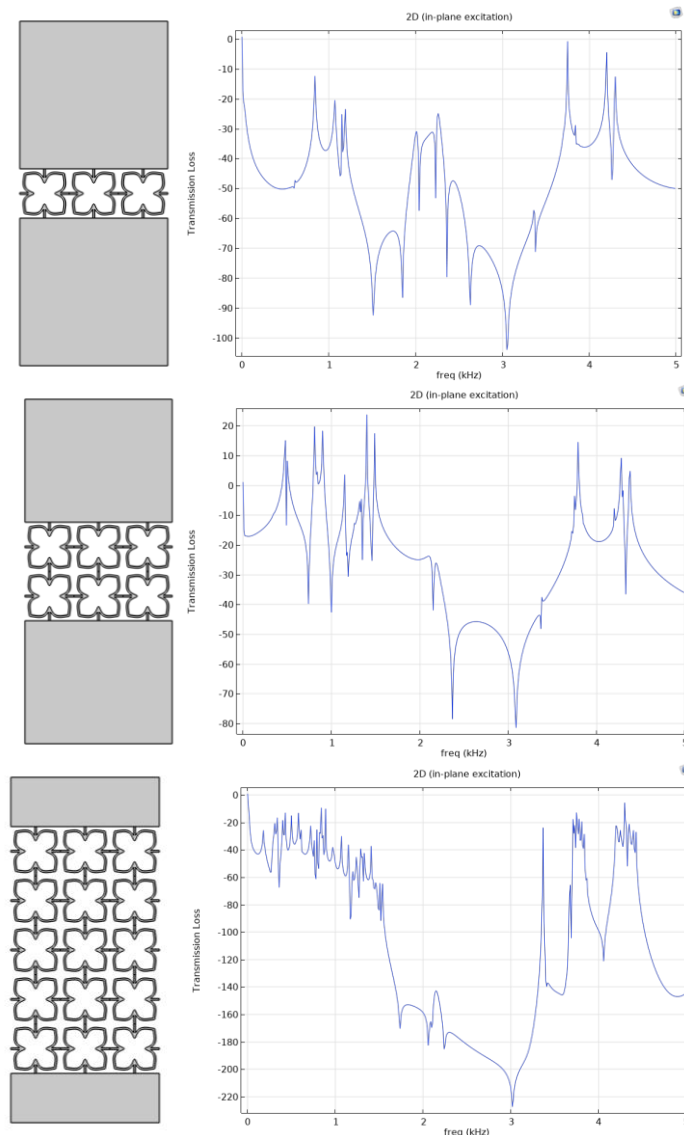
شکل ۷. شکل مد خارج از صفحه ضخامت ۱.۲۵ میلیمتر در فرکانس ۱۲۷۶ هرتز و ۲۱۵۴ هرتز نوار ممنوعه

۲-۲ نمودارهای تلفات انتقال ساختار دو بعدی

برای اعتبارسنجی قابلیت جداسازی ارتعاشات توسط تعداد محدودی سلول واحد جهت کاربرد عملی، انتقال جابجایی‌ها در سازه مشبک به صورت عددی بررسی شد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، یک تغییر مکان با مقدار ۱ میلی‌متر در جهت y در سمت پائین اعمال شده و پاسخ در مرز مقابل ثبت گردیده است. تمامی مرزها به جز نقطه تحریک به صورت آزاد تعریف شده‌اند. انتقال جابجایی به صورت زیر محاسبه شده است:

$$T = 20 * \log_{10} \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} \right) \quad (5)$$

که در آن U_{inp} مقدار جابجایی اعمال شده (۱ میلی‌متر) و U_{out} جابجایی اندازه‌گیری شده در نقطه پاسخ سمت مقابل است. انتقال‌پذیری در بازه‌های فرکانسی مختلف تحلیل و رسم شد و نتایج نشان دادند که در برخی بازه‌های فرکانسی مقدار انتقال منفی است که به معنای کاهش چگالی انرژی موج و مهار انتشار ارتعاش در آن بازه‌ها است. نوارهای تضعیف به روشنی قابل شناسایی هستند و نشان می‌دهند که ساختار مشبک مورد مطالعه قادر به تضعیف و جداسازی ارتعاشات در بازه‌های ویژه‌ای از فرکانس است.



شکل ۸. نمودار تلفات انتقال سازه باردیف‌های ۲ و ۵ تایی از سلول واحد

این نتیجه، تطابق مناسبی با پیش‌بینی‌های تئوریک و تحلیل ساختار نواری داشته و صحت طراحی ساختار و عملکرد مهندسی آن را تأیید می‌کند. نمودارهای انتقال تلفات نشان می‌دهند که هرچه تعداد سلول واحد در ساختار بیشتر باشد تأثیر کاهش ارتعاشات بیشتر خواهد بود. ماتریال معرفی شده در این پژوهش که از قابلیت تنظیم‌پذیری نوار ممنوعه به صورت دینامیکی برخوردار است، امکان استفاده مؤثر در حوزه‌های کنترل موج و ارتعاشات الاستیک را در اختیار قرار می‌دهد. ماهیت چندمنظوره این ساختار موجب می‌شود بتوان آن را در زمینه‌هایی مانند مهندسی سازه، مدیریت صوت و توسعه تجهیزات مکانیکی پیشرفته برای دستیابی به راهکارهای نوین در کنترل دقیق موج و کاهش ارتعاشات به کار گرفت.

۳- نتیجه‌گیری:

در این تحقیق، یک ماتریال مشبک جدید ارائه شد که با توجه به بازه فرکانسی مطالعه شده برای کاربردهای کاهش ارتعاشات صوت و نویز در ماشین‌آلات دقیق و چرخنده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و ویژگی‌های گپ فرکانسی و رفتار لرزه‌ای آن با کمک قضیه بلوخ و تحلیل مودال بررسی شد. ساختار شبکه‌ای ارائه شده بر پایه طراحی انعطافی بوده و با ایجاد رزونانس‌های موضعی، منجر به شکل‌گیری گپ فرکانسی متنوع، گسترده و قابل تنظیم شد. نقش لولاهای انعطافی و طراحی هندسی خاص در پدید آمدن این گپ‌ها بسیار کلیدی است. در گام نخست، سلول‌های واحد تکرارشونده به صورت بی‌نهایت مورد تحلیل قرار گرفتند تا سازوکار و ساختار گپ فرکانسی مشخص شود. سپس، نتایج شبیه‌سازی با بررسی ساختار مشبک محدود (در بازه‌های فرکانسی متناظر با نوار ممنوعه) صحت‌سنجی شد. این روند به درک کامل‌تر رفتار ماتریال پیشنهادی و کاربردهای بالقوه آن کمک می‌کند.

مراجع

1. X. duo Li *et al.*, "Analysis of vibration and noise reduction performance of 3D flower-shaped resonance structure with low-frequency bandgap," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 680, p. 415806, May 2024, doi: 10.1016/J.PHYSB.2024.415806.
2. A. Enayat Jazi and M. Karamooz Mahdiabadi, "Numerical and experimental investigation of bio-inspired lattice structures based on Camphor tree blossoms for vibration mitigation," *Structures*, vol. 76, p. 109001, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.109001.
3. G. Wang, C. W. Lim, and Z. Chen, "Lightweight self-similar hierarchical metamaterials with subwavelength and superwide bandgaps," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 280, p. 109527, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2024.109527.
4. H. Liu, F. Ren, K. Liu, and X. Li, "Multiple Re-Entrant Star-Shaped Honeycomb with Double Negative Parameters and Bandgap Properties," *Phys. status solidi*, vol. 259, no. 12, p. 2200277, Dec. 2022, doi: https://doi.org/10.1002/pssb.202200277.
5. R. P. Khawale, S. Bhattacharyya, R. Rai, and G. F. Dargush, "Efficient dynamic topology optimization of 2D metamaterials based on a complementary energy formulation," *Comput. Struct.*, vol. 299, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.compstruc.2024.107371.
6. I. Goda, "Bandgap tunability in pantographic metamaterials via flexure-based mechanisms," *Mater. Lett.*, vol. 357, p. 135629, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.MATLET.2023.135629.
7. Y. Li *et al.*, "Reveal resistance mechanisms of *Mirabilis jalapa* L. when exposed to galaxolide and polystyrene microplastics stress, from individual, cellular and molecular level," *Plant Physiol. Biochem.*, vol. 223, p. 109803, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.PLAPHY.2025.109803.