

متامتریال ها و بلورهای فونونی نسل جدید ابزارهای کنترل موج و ارتعاش مکانیکی

جواد محمدی^۱

^۱گروه مکانیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

روش های قدیمی برای کنترل ارتعاشات و صدا، مانند افزودن جرم، میراگر یا لایه های جاذب، اغلب با محدودیت هایی در وزن، حجم و پهنای فرکانسی مواجه بودند. در سالیان اخیر، با پیدایش مفهوم متامتریال های مکانیکی و بلورهای فونونی، رویکردهای بنیادین متفاوتی پیش روی محققان و مهندسان قرار گرفته است، به این ترتیب که به جای تمرکز بر خواص ذاتی مواد طبیعی، می توان با طراحی هندسی دوره ای یا موضعی ساختار، خواصی مانند باند ممنوعه فرکانسی، شکست منفی و مسپردگی موج را ایجاد و بررسی کرد. این مقاله مروری، مبانی فیزیکی بلورهای فونونی و متامتریال های ارتعاشی، روش های ساخت و کاربرد آنها در عایق بندی لرزه ای، کاهش صدا و ارتعاش در صنایع خودرو و هوافضا، و برداشت انرژی را بررسی می نماید و همچنین به محدودیت ها و روش های تحقیقات آینده در این حوزه می پردازد.

واژه های کلیدی: متامتریال، بلور فونونی، باند ممنوعه فرکانسی، کنترل ارتعاش، عایق بندی لرزه ای

۱. مقدمه

یکی از مهمترین مباحث و دغدغه های اصلی در مهندسی مکانیک و عمران، کنترل انتشار موج های الاستیک و صوتی در سازه ها بوده است. روش های کلاسیک، از قبیل افزودن جرم، استفاده از میراگرهای ویسکوز یا لایه های جاذب صوتی، معمولاً مؤثر بوده اند ولی دارای یک سری محدودیت ها نیز می باشند که از مهمترین آن ها افزایش وزن سازه، عملکرد وابسته به دما، و باند فرکانسی باریک می باشد. اما در پی این محدودیت ها، مفهوم بلور فونونی ساختاری متناوب متشکل از دو یا چند ماده با امپدانس صوتی متفاوت، نشان داده است که می توان با طراحی هندسی محض، بدون تغییر جنس مواد، بازه های فرکانسی مشخصی ایجاد نمود که در آن ها هیچ موجی اجازه انتشار ندارد که این پدیده باند ممنوعه^۱ نامیده می شود. [۱].

برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۹۰ موضوع بلور فونونی در اپتیک به صورت نظری برای موج های الاستیک و صوتی مطرح گردید و به سرعت با استفاده از نتایج تجربی این ایده مورد تأیید قرار گرفت [۲]. گسترش این مفهوم به متامتریال های مکانیکی، ساختارهایی که رفتار مؤثر آن ها فراتر از خواص مواد سازنده شان است، مطرح گردید که پژوهش های تازه ای را در طراحی سامانه های کنترل ارتعاشات و صدا باز کرده است که عایق بندی لرزه ای ساختمان ها تا پنهان سازی صوتی و کنترل دقیق مسیر انرژی مکانیکی نمونه هایی از این موضوع می باشد [۳].

۲. مبانی و ساختار متامتریال های ارتعاشی

۲-۱. بلورهای فونونی و باند ممنوعه براگ

در بلورهای فونونی نوع براگ، تناوب هندسی ساختار در مقیاسی با طول موج الاستیک هم مرتبه عبوری، سبب تداخل مخرب امواج بازتابیده از مرزهای واحد تکرار شونده می شود و در نتیجه باند ممنوعه به وجود می آید. این مکانیزم، مشابه پدیده براگ در بلورهای فوتونی است، اما به دلیل نیاز به دوره تناوب هم مرتبه با طول موج، برای فرکانس های پایین مانند لرزه های زمین یا صداهای بم نیاز به ابعاد ساختاری بسیار بزرگی دارد [۴] [۵].

۲-۲. مواد با تشدید موضعی

برخلاف باند ممنوعه براگ، مواد تشدید موضعی با قرار دادن اجزای تشدید کننده کوچک مانند یک هسته سنگین محصور در پوسته ای نرم در یک زمینه، می توانند باند ممنوعه ای در فرکانس های بسیار پایین تر از آنچه ابعاد ساختار ایجاب می کند، تولید کنند. این موضوع برای اولین بار در قالب مواد صوتی تشدید موضعی مطرح گردید که امکان طراحی ساختارهای فشرده و سبک برای کنترل ارتعاش در فرکانس های پایین دارد. این موضوع در مسائل واقعی صنعتی و عمرانی می تواند از اهمیت زیادی برخوردار شود [۶] [۷].

¹ Band Gap

۳-۲. متامتریال‌های فعال و تنظیم‌پذیر

نسل جدیدتری از این ساختارها، با تعبیه عناصر فعال مانند پیزوالکتریک‌ها، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی یا سیالات مغناطیسی درون واحد تکرارشونده، امکان تنظیم پویا و برخط محل و پهنای باند ممنوعه را فراهم می‌کنند. این ویژگی در موضوعاتی که دارای فرکانس تحریک محیطی متغیر یا غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد، دارای اهمیت زیادی می‌باشد.

۳. کاربردها

۳-۱. عایق‌بندی لرزه‌ای ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها

یکی از کاربرد های مهم درمهندسی سازه، متامتریال‌های زلزله‌ای^۲ با طراحی ساختارهای مدفون در خاک یا پی ساختمان می‌باشد. این مواد به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که موج‌های لرزه‌ای با فرکانس خطرناک برای سازه، پیش از رسیدن به ساختمان، منحرف یا میرا شوند. این شیوه، مکمل روش‌های سنتی جداساز لرزه‌ای است و بخصوص برای محافظت از زیرساخت‌های حیاتی مانند نیروگاه‌ها یا بیمارستان‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۸].

۳-۲. کاهش صدا و ارتعاش در خودرو و هوافضا

استفاده از پانل‌های متامتریالی سبک‌وزن می‌توانند در باند فرکانسی مشخصی صدای درون کابین خودرو یا هواپیما را بدون افزودن وزن قابل توجه کاهش دهند. این ویژگی مزیتی مهم در حوزه صنعت می‌باشد که هر گرم وزن اضافه آن، می‌تواند هزینه سوخت و آلایندگی را بطور قابل توجهی افزایش دهد.

۳-۳. پنهان‌سازی ارتعاشی و مسیردهی موج

یکی از کاربردهای مهم‌تر و پیشرفته‌تری که در این خصوص می‌توان به آن اشاره کرد، کلوک‌سازی ارتعاشی است. در این روش طراحی پوسته‌ای متامتریالی اطراف یک جسم که مسیر امواج الاستیک را طوری خم می‌کند که گویی جسم اصلاً وجود ندارد. از این قابلیت در حفاظت از تجهیزات حساس در برابر ارتعاشات محیطی یا در طراحی موج برهای الاستیک برای انتقال کنترل شده انرژی ارتعاشی می‌توان استفاده نمود.

۳-۴. تلفیق با برداشت انرژی

از ساختارهای فونونی می‌توان برای متمرکز کردن و تقویت انرژی ارتعاشی در نقاط مشخصی از یک سازه، پیش از آنکه انرژی متمرکز شده توسط یک مبدل پیزوالکتریک یا الکترومغناطیسی به الکتریسیته تبدیل شود، استفاده نمود که این شیوه می‌تواند بازده کلی سامانه‌های برداشت انرژی ارتعاشی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۹].

²Seismic Metamaterials

۴. چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

با توجه به اینکه به کارگیری گسترده ماتریال‌های ارتعاشی در صنعت از قابلیت‌های بالایی برخوردار است اما با چند چالش مهم روبرو می‌باشد. یکی از این چالش‌ها این است که بسیاری از طراحی‌های آزمایشگاهی برای دستیابی به باند ممنوعه در فرکانس‌های پایین صنعتی کمتر از ۱۰۰ هرتز، به ابعاد یا جرمی نیاز دارند که برای کاربرد عملی نامناسب می‌باشد. از دیگر چالش‌ها می‌توان به تولید انبوه ساختارهای پیچیده دوره‌ای یا شبکه‌ای اشاره کرد. انجامی که با گسترش چاپ سه‌بعدی این موضوع تسهیل شده است اما هنوز از نظر اقتصادی برای بسیاری از کاربردها مقرون به صرفه نمی‌باشد. یکی از دیگر چالش‌ها این است که بیشتر ماتریال‌های موجود غیرفعال هستند و پس از ساخت، قابلیت تطبیق با تغییرات محیطی یا شرایط بار متغیر را ندارند.

از تحقیقات و مطالعات پژوهشی پیش رو در آینده، می‌توان بر توسعه ماتریال‌های چندعملکردی که همزمان کنترل ارتعاش، برداشت انرژی و تحمل بار سازه‌ای را فراهم می‌کنند، بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توپولوژیک و یادگیری ماشین برای طراحی خودکار واحدهای تکرارشونده با عملکرد هدفمند، و توسعه ماتریال‌های فعال و تنظیم‌پذیر با پاسخ بلادرنگ به شرایط محیطی متمرکز است، اشاره نمود.

۵. نتیجه‌گیری

ماتریال‌ها و بلورهای فونونی، نمونه آشکاری هستند که در مهندسی مکانیک مدرن، هندسه می‌تواند به اندازه جنس ماده در تعیین رفتار یک سازه نقش داشته مهمی داشته باشد. با استفاده از این موضوع از یک تحقیق نظری به ابزاری کاربردی برای عایق‌بندی لرزه‌ای، کاهش صدا و بهبود برداشت انرژی، این انتظار وجود دارد که در سال‌های آینده استفاده گسترده تری از این فناوری در صنایع ساختمان، خودرو و هوافضا شاهد باشیم.

مراجع

1. Rao, S. S. (۲۰۱۷). Mechanical Vibrations. Pearson Education.
2. Sigalas, M. M., & Economou, E. N. (۱۹۹۲). Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of Sound and Vibration*, ۱۵۸(۲), ۳۷۷-۳۸۲.
3. Kushwaha, M. S., Halevi, P., Dobrzynski, L., & Djafari-Rouhani, B. (۱۹۹۳). Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, ۷۱(۱۳), ۲۰۲۲-۲۰۲۵.
4. Martínez-Sala, R., Sancho, J., Sánchez, J. V., Gómez, V., Llinares, J., & Meseguer, F. (۱۹۹۵) Sound attenuation by sculpture. *Nature*, ۳۷۸(۶۵۵۴), ۲۴۱.
5. Laude, V. (۲۰۲۱). Principles and properties of phononic crystal waveguides. *APL Material* ۹(۸) ۰۸۰۷۰۱.
6. Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T., & Sheng, P. (۲۰۰۰). Locally resonant sonic materials. *Science*, ۲۸۹(۵۴۸۵), ۱۷۳۴-۱۷۳۶
7. Aravantinos-Zafiris, N., Sigalas, M. M., Kafesaki, M., & Economou, E. N. (۲۰۱۴). Phononic crystals and elastodynamics: Some relevant points. *AIP Advances*, ۴(۱۲), ۱۲۴۲۰۳.
8. Muhammad, & Lim, C. W. (۲۰۲۲). From photonic crystals to seismic metamaterials: A review via ,phononic crystals and acoustic metamaterials. *Archives of Computational Methods in Engineering* ۱۱۹۸-۱۱۳۷ ,(۲)۲۹.
9. Lee, G., Lee, D., Park, J., Jang, Y., Kim, M., & Rho, J. (۲۰۲۲). Piezoelectric energy harvesting using mechanical metamaterials and phononic crystals. *Communications Physics*, ۵(۱), ۹۴.

Metamaterials and Phononic Crystals A New Generation of Wave and Vibration Control Tools

Javad Mohammadi^{*1}

^{1*}Department of Mechanic, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

Abstract

Traditional methods for controlling vibration and noise, such as added mass, dampers, or absorptive layers, have often faced limitations in weight, volume, and frequency bandwidth. In recent years, the emergence of mechanical metamaterials and phononic crystals has opened up fundamentally different approaches for researchers and engineers: instead of relying on the intrinsic properties of natural materials, periodic or locally engineered geometric designs can be used to achieve properties such as frequency band gaps, negative refraction, and wave steering. This review paper examines the physical foundations of phononic crystals and vibrational metamaterials, their fabrication methods, and their applications in seismic isolation, noise and vibration reduction in the automotive and aerospace industries, and energy harvesting, and also addresses the limitations and future research directions in this field.

Keywords: Metamaterial, Phononic Crystal, Frequency Band Gap, Vibration Control, Seismic Isolation