نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

ISSN: 1605-9719
DOI: 10.30506/MMEP.2022.526651.1905

مروری بر انواع فراماد و کاربرد آن در کاهش نویز و ارتعاشات ناخواسته

سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی*
استادیار

هومن وطن دوست
دانشجوی کارشناسی ارشد

علیرضا رشیدمنافی
دانشجوی دکتری،
آزمایشگاه تحقیقاتی سیستم‌های دینامیکی خودرو،
دانشکده مهندسی خودرو،
دانشگاه علم و صنعت ایران،
تهران

چکیده: امروزه به منظور کاهش نویز و ارتعاشات از فراماد به عنوان مانع، میرا کننده و یا جاذب ارتعاش و صوت در حوزه های مختلفی چون هوافضا، خودرو و کنترل آلاینده های صوتی استفاده می شود. این مواد، موادی مصنوعی ساخته شده از سلول های واحد با ابعادی کوچکتر از طول موج امواج صوتی مورد نظر هستند که در ابعاد بزرگتر به صورت متناوب تکرار شده اند و می توانند دامنه ی امواج صوتی را در بازه فرکانسی مورد نظر به صورت مؤثر کاهش دهند. در این مقاله مروری، به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه فراماد مختلف به خصوص فراماد آکوستیکی و الاستیکی پرداخته شده و کاربردها و نتایج آن ها در کاهش نویز و ارتعاشات ناخواسته محیط مورد مطالعه قرار گرفته است. در اکثر تحقیقات محاسبات عددی با استفاده از قضیه بلاک-فلوکوت برای محاسبه فاز بلاک سلول واحد فراماد صوتی انجام شده که در این قضیه گپ انرژی پیش بینی شده از فاز بلاک محاسبه شده از فرکانس صفر شروع می‌شود و تا فرکانسی که دارای مقدار انتقال کمتر از یک می‌باشد ادامه پیدا می‌کند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد با استفاده از فراماد می‌توان ارتعاشات و نویز فرکانس-پایین یک سیستم را در حد مطلوبی کاهش داد. همچنین افزایش دمپینگ جاذب‌ها بطور مستقیم باعث افزایش عرض باند توقف و کاهش دامنه ی ارتعاش در فرکانس پائین به وسیله افزایش فاصله باندی انرژی می‌شود. افزایش درجات آزادی رزوناتورهای محلی نیز از روش های دیگر افزایش گپ انرژی است.

واژه های راهنما: فراماد، الاستیک، آکوستیک، ارتعاش کننده محلی، نویز، فرکانس

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

A review of the types of metamaterials and their application in reducing unwanted noise and vibrations

Salman Ebrahimi-Nejad Rafsanjani*
Assistant Professor

Hooman Vatandoost
M.Sc. Student

Alireza Rashidmanafi
PhD Student,
Vehicle Dynamical Systems Research Lab,
Faculty of Automotive Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran

Abstract: Today, in order to reduce noise and vibrations, meta-materials are used as a barrier, attenuator or absorber of vibration and sound in various fields such as aerospace, automotive and pollutant control. Meta-materials are synthetic materials made from single cells with dimensions smaller than the desired wavelength of sound waves, repeated alternately in a larger scale, which can effectively reduce the amplitude of sound waves in the desired frequency range. In this review article, research conducted in the field of various metamaterials, especially acoustic and elastic metamaterials, and their applications and results in reducing noise and unwanted vibrations of the environment have been studied. In most researches, numerical calculations have been performed using the Bloch-Floquet theorem to calculate the Bloch cell phase of a single metamaterial cell. The results of this research show that by using acoustic and elastic meta-materials, the vibrations and low frequency noise of a system can be reduced to a desirable level. It becomes a means of increasing the energy band gap. Increasing the degree of release of local resonators is another way to increase energy gap and further reduce vibration.

Keywords: Metamaterials, Elastic, Acoustic, Local Resonator, Noise, Frequency

* نویسنده مسئول، ebrahiminejad@iust.ac.ir

۱- مقدمه

در حال حاضر اصطلاح فراماواد به‌طور گسترده در مواد مهندسی، معمولاً کامپوزیت‌ها، به‌کار برده می‌شود که از یک ساختار داخلی برای ایجاد خواص مؤثر در مواد مصنوعی تشکیل شده است و اساساً این خواص متفاوت از خواص مواد موجود در اجزای آن است. این اصطلاح از زمینه مواد الکترومغناطیس نشأت گرفته، که در آن فراماواد برای کنترل پخش نور و امواج رادیویی و به‌طور خاص برای نشان دادن مواد تشکیل‌شده از ساختارهای هدایت‌شده استفاده شده است که با تولید واکنش‌های کنترل الکتریکی و مغناطیسی دوقطبی در زمینه‌های کاربردی باعث ایجاد یک شاخص منفی می‌شود. این ویژگی در هیچ ماده شناخته شده طبیعی وجود ندارد. واژه فراماواد به طور دقیق تعریف نشده است ولی یک تعریف خوب برای کاربرد آن عبارت است از: یک ماده با خواص مؤثر بر اساس نیاز بدون محدودیت‌هایی که در مواد طبیعی وجود دارد.

۲- فراماواد و انواع مختلف آن

فراماواد طبقه بندی جدیدی از کامپوزیت‌های نیمه‌فعال هستند که در سال ۲۰۰۱ میلادی توسط آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاع امریکا[1]برای نشان دادن خواص استثنائی مواد که در طبیعت یافت نمی‌شوند و یا اینکه در مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها مشاهده نشده به منظور توسعه فناوری‌های جدید پیشنهاد شدند [۱]، [۲].

خواص استثنائی فراماواد با استفاده از ساختار مهندسی آن‌ها بصورت مصنوعی ساخته شده‌اند و ناهماهنگی ابعادی بسیار کمی دارند. این مفهوم باعث شده است که محققان بتوانند از بند محدودیت عملکرد مواد متعارف موجود در طبیعت بیرون آیند و به ویژگی های غیرمتعارفی از مواد دست پیدا کنند [۳]، [۴].

در ابتدا از فراماواد برای تحقیق در زمینه امواج الکترومغناطیسی [۵]، [۶] استفاده می‌شده و سپس محققان شروع به بررسی استفاده از فراماواد در امواج صوتی کردند [۷]. وقتی امواج الکترومغناطیس وارد ماده شد، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی آن با الکترون‌های ماده و دیگر اتم‌ها و ملکول‌ها دچار واکنش شده و این اتفاق باعث می‌شود که سرعت امواج و طول موج آن‌ها زمانی‌که رزونانس بصری محلی[2]اتفاق می‌افتد دچار تغییر شود.

۲-۱- فراماواد آکوستیک

آکوستیک شاخه‌ای از علم است که انتشار امواج صوتی و ارتعاش را بررسی می‌کند. شنیدن امواج صوتی در همه جا یک تجربه‌ی روزانه به شمار می‌آید. این امواج مبنای ارتباطات کلامی انسان است. امواج با فرکانس بیشتر از محدوده شنوائی انسان در پزشکی برای دستگاه‌های تصویربرداری اولتراسونیک و در صنعت استفاده می‌شود. با این حال، کنترل امواج صوتی همیشه آسان نیست. تراز شدت صوت امواج با انتشار در هوا به‌دلیل مقاومت هوا و رطوبت کاهش می‌یابد که معمولاً به راحتی در موانع ضخیم نفوذ می‌کند. دستگاه‌های الکترونیکی قادر به تقویت سیگنال‌های صوتی و تغییر آن‌ها هستند، البته پس از تبدیل امواج به سیگنال‌های الکترونیکی قابل تقویت و تغییر هستند. نتیجه استفاده از ابزار جدید برای کنترل این امواج در شکل مواد مصنوعی، بسیار مطلوب است. حال با توجه به تعریف آکوستیک، می‌توان گفت فراماواد آکوستیک اولین فراماواد مصنوعی (کره‌های پوشش داده شده با پلاستیک) هستند متشکل از ساختارهایی با طول موج کوتاه که با تشدید محلی به امواج صوتی ورودی پاسخ می‌دهند. مجموعه‌ای از این اتم‌های بزرگ درون فراماواد خاص بودن را نشان می‌دهد، اما این خاصیت می‌تواند برای ویژگی‌های صوتی مفید می‌باشد.

امروزه طراحی کردن فرامادی برای پنهان کردن یک شیء نیز امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین، از فراماواد صوتی با ضریب شکست منفی برای تغییر جهت امواج صوت پخش شده از بلندگو استفاده می‌شود که این کارها باعث ایجاد روش‌های جدیدی برای تمرکز و شکل دادن به موضوعات مربوط به صوت می‌شود.

در طول ۱۵ سال گذشته، موضوعات مربوط به فراماواد صوتی به چندین شاخه مختلف تقسیم شدند و نشان دادند که امواج صوتی می‌توانند به روش‌هایی که قبلاً حتی تصور نمی‌شد دستکاری و کنترل شوند.

۲-۲- فراماواد الاستیک

فراماواد الاستیک به منظور طراحی‌های خاص ریزساختار مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. از این مواد برای بدست آوردن ویژگی دینامیکی موثر مواد که در طبیعت یافت نمی‌شود استفاده می‌شود. مبنای کاری فراماواد الاستیک این است که از ریزساختارهای ساخته‌ی دست بشر (تشدیدگرهای محلی) در

[1] DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency

[2] Local optical resonance

مقیاس‌های کوچکتر از طول موج مورد بررسی استفاده می‌شود. بنابراین، فاصله-باندی[1]آکوستیکی (محدوده فرکانسی که امواج آکوستیکی در ساختار متناوب نمی‌توانند منتشر شوند) در آن زیاد بوده و امواج صوتی با فرکانس کم نمیتوانند در آن منتشر شوند. در بعضی از کامپوزیت‌ها فاصله-باندی انرژی امواج کم فرکانس توسط چگالی جرمی موثر منفی در سیستم‌های جرم-فنر به صورت مجزا توضیح داده شده است.

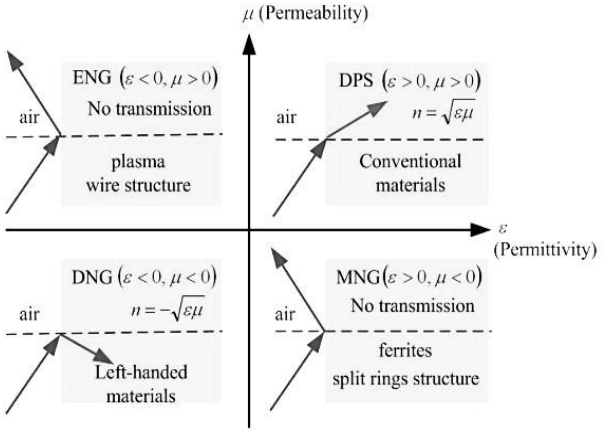
یکی از کاربردهای مهم مهندسی فراماد الاستیک جذب ارتعاش در فرکانس‌های کم می‌باشد. علاوه بر قانون بازتابش براگ در بلورهای واکنشی، مکانیزم رزونانس موضعی می تواند با طراحی مناسب ریزساختار و انرژی ارتعاشی فرکانس-پایین با مقدار بسیار کمی از ریزساختارهای دوره‌ای به سرعت تضعیف شود. بنابراین، ساختارهای عظیم برای محافظت از موضوع ساختاری در ارتعاش فرکانس-پایین نیاز نمی‌باشد.

ساختارهای مهندسی از قبیل میله‌ها، تیرها و ورق‌ها با طراحی‌های مطلوب رزونانس موضعی ریزساختار برای دفع ارتعاشات بکار گرفته می شوند.

۲-۳- فراماد الکترومغناطیس

مفهوم فراماد در ابتدا برای امواج الکترومغناطیسی معرفی شده است که اکنون به‌عنوان فراماد الکترومغناطیسی طبقه‌بندی شده است. فراماد الکترومغناطیسی ساختارهای دست‌سازی دارند که در مقیاس طول موج کوتاه به‌منظور دستیابی به قابلیت‌های غیرطبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند، این فراماد دارای خواص الکترومغناطیسی‌ای هستند که در مواد طبیعی یافت نمی‌شود.

ویژگی‌های الکترومغناطیسی مواد الکترونیک عمدتاً به‌وسیله‌ی پارامترهای فیزیکی انعطاف‌پذیری، نفوذپذیری و هدایت‌پذیری تعیین می‌شوند. تمام مواد الکترومغناطیس می‌توانند مطابق شکل۱ طبقه‌بندی شوند. در این شکل، برای مقادیر مثبت و منفی پارامترهای انعطاف‌پذیری (ε) و نفوذپذیری (μ) چهار حالت مختلف به اینصورت که مقادیر مثبت این دو پارامتر[2] دسته اول، نفوذپذیری مثبت و انعطاف‌پذیری منفی[3] دسته دوم، مقادیر مثبت انعطاف‌پذیری و منفی نفوذپذیری[4] دسته سوم و نفوذپذیری و انعطاف‌پذیری منفی[5]در دسته چهارم در نظر گرفته شده‌است. به طور خاص، مواد با انعطاف پذیری و نفوذپذیری منفی، موادهای چپ دست[6]و یا با شاخص منفی نامیده می‌شوند.



شکل ۱ طبقه بندی مواد بر اساس نفوذپذیری و انعطاف پذیری

۳- ویژگی های فراماد

نفوذپذیری مغناطیسی یک از ویژگی‌های هر محیط است که رابطه‌ی بین چگالی شار مغناطیسی (B) و شدت میدان مغناطیسی (H) را تعیین می‌کند و واحد آن هانری بر متر می‌باشد. گذردهی یکی از مهمترین ویژگی‌های دی الکتریک‌ها و بیانگر توانایی دی الکتریک در ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است. گذردهی هر محیط برابر است با حاصلضرب گذردهی خلأ در گذردهی نسبی. گذردهی را می‌توان میزان قطبیت پذیری یک ماده دانست. اگر ماده‌ای گذردهی بالاتری نسبت به یک ماده دیگر داشته باشد، در میدان الکتریکی یکسان، می‌تواند بار الکتریکی بیشتری در خود ذخیره کند.

کریستال‌های فونونی دارای سازه‌های دی‌الکتریک و فلزی هستند که قادر به دستیابی به سرعت فاز منفی می‌باشند. این مواد برای نشان دادن بسیاری از سیالات متخلخل متناوب، الاستیک و ترکیبی از این دو استفاده می‌شوند.

اصطلاح کریستال فونونی ابتدا در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی به‌عنوان کریستال‌های آنالوگ فوتونی مورد بررسی قرار گرفت. این موضوع امروزه به یک موضوع داغ در زمینه فیزیک ماده چگال تبدیل شده است. کریستال‌های فونونی اکنون می‌توانند بر اساس ساختارهای توپولوژی فضایی به یک، دو و سه بعدی طبقه بندی شوند. هنگامی‌که امواج الاستیک از طریق کریستال های فونونی پخش می‌شوند، رابطه پراکندگی ویژه تولید می‌شود.

[1] Band-gap
[2] DPS:Double-Positive
[3] ENG: ε -negative
[4] MNG: Mu-Negative
[5] DNG:Double-Negative
[6] Left-Handed

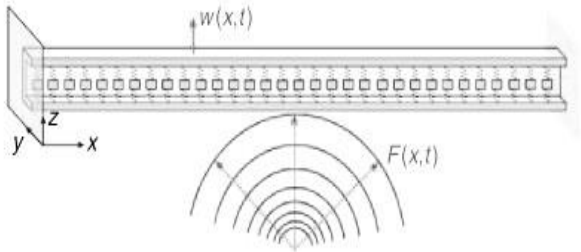
محدوده فرکانسی بدون منحنی‌های پراکندگی را گپ انرژی گویند که ارتعاشات و صوت در این ناحیه نمی‌توانند منتشر شوند.

۳-۱- خواص گپ انرژی فراماواد الاستیک با جاذب ارتعاش دینامیکی بر پایه دمپر مکانیکی[1]

فنگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ در دانشگاه ژی‌جیانگ چین فراموادی طراحی کردند که با افزودن یک سیستم فنر به سیستم جرم و فنر یک تیر فراماواد باعث افزایش گپ انرژی در بازه فرکانسی محدوده کاری مورد نظر شده است. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش یک فنر به سیستم جرم و فنر یک تیر فراماواد موفق به دفع بیشتر ارتعاشات نسبت به تیر فراماواد معمولی که قبلاً طراحی کرده شده است. سیستم جرم و فنر اضافه شده به فراماواد موجود، حرکت خطی بوجود آمده در تیر را به حرکت دورانی تبدیل می‌کند، در نتیجه دو گپ انرژی در فرکانس‌های پایین و بالا ایجاد می‌شود. بدین صورت که با افزایش اینرسی و تعریف یک درجه آزادی جدید در سیستم گپ انرژی جدید ایجاد می‌شود. در این مقاله ارتعاشات وارد بر فراماواد الاستیک مجهز به یک سیستم جرم و فنر اضافی مورد بررسی قرار گرفته و درباره‌ی پتانسیل استفاده از این سیستم در عریض کردن گپ انرژی بطور کامل بحث شده است.

۳-۲- تئوری تیرهای ساخته شده از فراماواد به منظور جذب ارتعاش باند گسترده

در یک تحقیق در سال ۲۰۱۰ توسط سان و همکاران [۹] در دانشگاه میزوری امریکا روشی برای مدل کردن، آنالیز و طراحی تیر ساخته شده از فراماواد برای جذب ارتعاش باند گسترده معرفی شده است. تیر پیشنهادی شامل ساختار یکپارچه همسانگرد با تعداد زیادی زیرسیستم فنر-جرم-دمپر کوچک که در طول تیر پخش شده و به‌عنوان جاذب ارتعاش عمل می‌کنند می‌باشد.

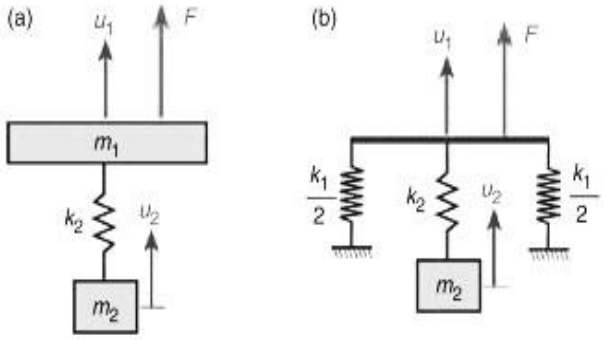


شکل ۲ تیر فراماواد برای جذب ارتعاشات [۹]

برای یک سلول واحد از این تیر معادلاتی با استفاده از اصل همیلتون بدست می‌آید. وجود گپ انرژی لزوم استفاده از مدلی بر پایه‌ی خواص متوسط مواد در طول یک سلول و مدلی بر پایه‌ی مدلسازی المان محدود و همچنین تئوری بلاک-فلوکوت[2]برای ساختارهای دوره ای را نشان می دهد. این مدل‌های ایده‌آل نمی‌توانند برای تیرهای محدود و یا امواج الاستیکی که طول موج کوتاهی دارند استفاده شود. برای تیرهای محدود متشکل از فراماواد روش المان محدود خطی برای مدلسازی و آنالیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این تیرها استفاده از جاذب‌های دورانی توصیه شده است. شبیه سازی عددی نشان می‌دهد که مبنای اصلی نوع کارکرد مکانیزم تیر فراماواد پیشنهاد شده همان مفهوم رایج جاذب‌های مکانیکی ارتعاشات است. امواج الاستیک وارد شده به تیر برای تحریک کردن جاذب‌های فنر-جرم-دمپر بکار می‌روند تا در فرکانس‌هایی بالاتر از فرکانس های محلی تیر ارتعاش کند و نیروی برشی و گشتاور خمشی مورد نیاز برای مستحکم نگه داشتن تیر و توقف انتشار موج در تیر را تولید کند.

برای امواج فرکانس بالا، شرایط مرزی ساختار تأثیر زیادی روی عملکرد جاذب‌ها ندارد درصورتیکه برای جذب ارتعاشات در امواج فرکانس پائین شرایط مرزی و مودهای تشدید ساختار باید در نظر گرفته شوند. با توجه به محاسبات لازم برای طراحی استفاده از جاذب‌های فنر-جرم-دمپر مجزا که بصورت محدود در طول تیر نصب شده است مناسب است.



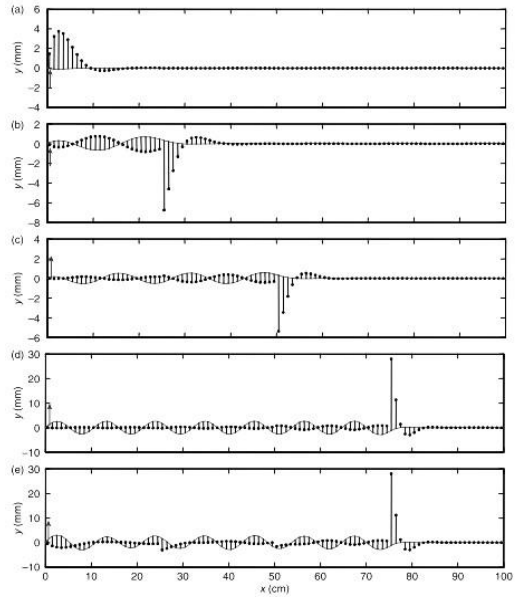
شکل ۳ مدل دو درجه آزادی (a) جرم در جرم (b) جرم در فنر [۹]

۳-۳- استفاده از تیر فراماواد الاستیک کایرال به منظور دفع ارتعاشات باند گسترده

در سال ۲۰۱۴، ژو و همکاران [۱۰] در دانشگاه آلکانزاس امریکا با طراحی تیری با استفاده از فراماواد الاستیک که دارای

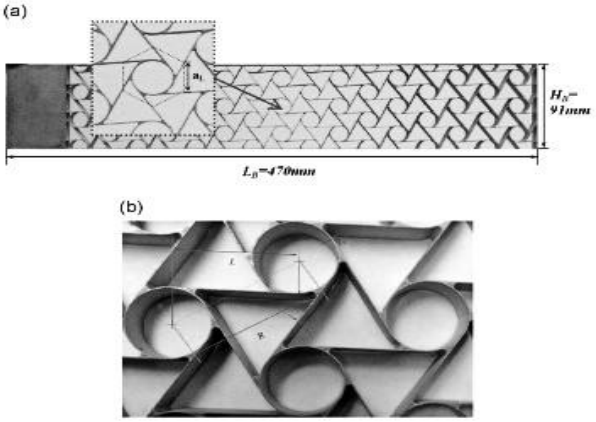
[1] IDVA: Inerter-Based Dynamic Vibration Absorbers

[2] Bloch-Floquet theory

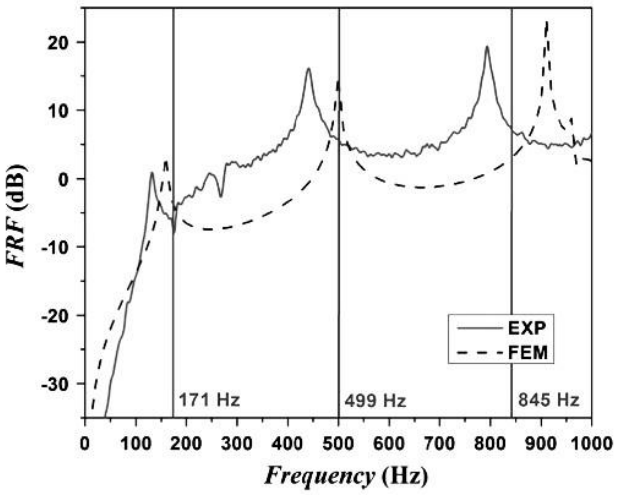


شکل ۴ حالت پایدار موج یک تیر فراماد با نیروهای برشی متفاوت [۹]

تشدیدگرهای محلی می‌باشد توانستند بدون اینکه ظرفیت بار برشی تیر را کم کنند، ارتعاشات وارد بر تیر در باند گسترده را دفع کنند. در ابتدا یک مدل تئوری از تیر به منظور بررسی رفتار گپ انرژی با تشدیدگرهای چندگانه پیشنهاد شده است. باندهای گذرگاهی جدیدی برای واکنش دینامیکی بین تشدیدگرها شکل می‌گیرد که به عنوان مانعی برای دفع کامل ارتعاشات وارد بر تیر عمل می‌کنند. در آنالیز فاکتور تلفات ارتعاش تشدیدگر، تیر فراماد الاستیک با تشدیدگرهایی که بصورت بخش بخش در طول تیر توزیع شده‌اند برای فراهم کردن دفع ارتعاشات باند گسترده پیشنهاد شده است. در نهایت تیر فراماد الاستیک که بصورت کایرال شبکه بندی شده است بدست آمده و برای اعتبارسنجی، مدلی تجربی مورد بررسی و تست قرار گرفته است.



شکل ۵ (a) تیر شبکه بندی شده کایرال (b) موقعیت قرارگیری شبکه شش وجهی کایرال [۱۰]



شکل ۶ نمودار تابع پاسخ فرکانسی[1] برای روش المان محدود و تست آزمایشگاهی [۱۰]

۳-۴- گپ انرژی ارتعاشات برای میله‌های فراماد الاستیک با استفاده از امواج

در یک تحقیق انجام شده توسط نوبرگا و همکاران [۱۱] در دانشگاه کمپیناس برزیل در سال ۲۰۱۶ باندهای توقف میله های فراماد الاستیک با تشدیدگرهای محلی که به‌طور متناوب در طول تیر توزیع شده‌اند بررسی شده است. دو روش جدید برای بررسی سیستم‌های فراماد در این مقاله استفاده شده است.

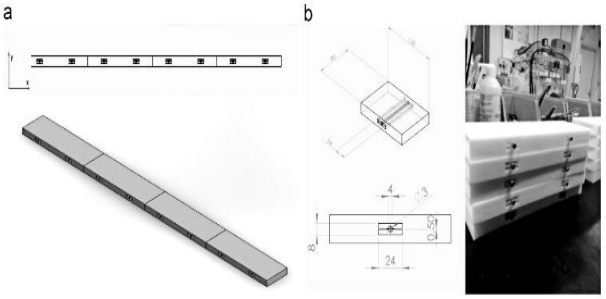
روش اول که به "روش المان طیفی موج[2]" معروف است شامل روش المان طیفی و تئوری بلاک-فلوکوت می‌باشد. روش دوم یک روش جدید است که به "روش المان محدود موج[3]" نامگذاری شده است، این روش برای محاسبه رفتار دینامیکی در ساختار سیستم‌ها و سیستم‌های متناوب صوتی توسعه داده شده است. استفاده از این روش مشابه روش المان طیفی است که با روش المان محدود جایگزین شده است.

در این مقاله از روش المان محدود موج برای محاسبه‌ی باندهای توقف در میله‌های فراماد الاستیک که به‌صورت فضایی و متناوب توزیع شده‌اند و شامل تشدیدگرهای چند درجه آزادی می‌باشند استفاده شده است.

باندهای توقف ایجاد شده توسط پراکندگی براگ و تشدیدگرهای محلی با روش المان محدود موج محاسبه و با روش المان طیفی موج اعتبارسنجی شده و نتایج به‌دست آمده به شکل تابع پاسخ فرکانسی نمایش داده شده‌اند. از یک میله‌ی ساخته

[1] FRF: Frequency Response Function
[2] WSEM : Wave Spectral Element Method
[3] WFEM : Wave Finite Element Method

شده از پلاستیک در دستگاه پرینتر سه بعدی به‌عنوان میله‌ی فراماده الاستیک استفاده می‌شود که تشدیدگرهای محلی روی آن تأثیر نگذاشته‌اند.

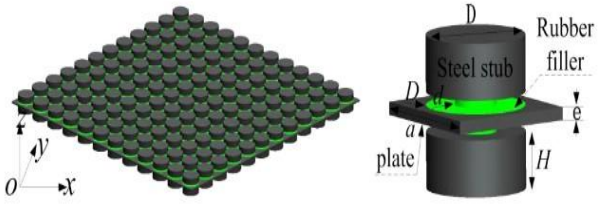


شکل ۷ (a) شبیه سازی هدایتگر موج (b) ابعاد تشدیدگر محلی و شکل ظاهری آن [۱۱]

نتایج بدست آمده از تست آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روش پراکندگی براگ مقایسه شده است. هر دو روش عددی مکان و عرض باند توقف را با خطای بسیار کمی نسبت به تست آزمایشگاهی درست محاسبه کرده‌اند.

۳-۵- گپ انرژی کامل ارتعاشات در فرکانس پائین در صفحات فراماده الاستیک

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹ توسط لی و همکاران [۱۲] در دانشگاه شی‌ئو در چین سعی بر آن شده که با استفاده از فراماده الاستیک ضخیم از جنس فولاد و ایجاد یک گپ انرژی کامل بتوان نویز و ارتعاشات را کاهش داد. از صفحات فراماده الاستیک با توجه به شرایط خاص فیزیکی مرتبط با گپ انرژی می‌توان برای کاهش نویز و ارتعاشات استفاده کرد. ساختار استفاده شده در این مقاله شامل تشدیدگرهای مرحله‌ای، دو طرفه و متناوب است که بر روی یک صفحه‌ی کریستالی فونونیک با تشدیدگرهای دو بعدی قرار دارد. در شکل ۸ صفحه فراماده پیشنهادی مشاهده می‌شود.



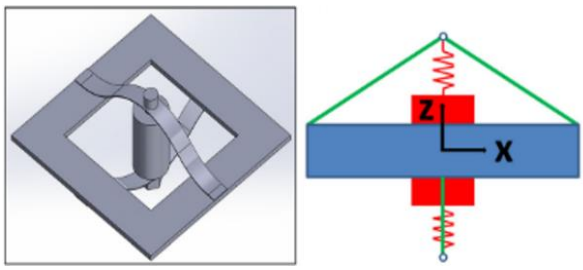
شکل ۸ صفحه فراماده پیشنهادی و سلول واحد آن [۱۲]

صفحه کریستالی فونونی شامل مجموعه‌ای از قطعات پلاستیکی است که درون ورق فولادی ضخیم قرار گرفته است. روابط پراکندگی، طیف‌های انتقال قدرت و میدان‌های جابجایی مدل‌های خاص با استفاده از روش المان محدود محاسبه می‌شود. نتایج به‌دست آمده برای مدل پیشنهادی نشان می‌دهد باز شدن اولین گپ انرژی ارتعاشات در مقایسه با یک صفحه فراماده الاستیک فولاد با ضخامت معمولی با یک فاکتور ۹,۵ کاهش می‌یابد.

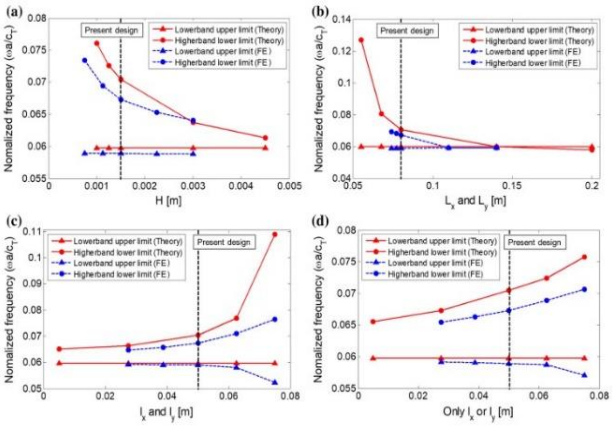
این اتفاق سبب می‌شود که موج‌های الاستیک کم فرکانس کاهش یابد. مکانیزم‌های تولید گپ انرژی معمولاً به‌صورت عددی بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مکانیزم تشکیل گپ انرژی در یک فرکانس پایین جدید می‌تواند به اتصال بین یک حالت تشدیدگر محلی از تشدیدگرهای مرحله‌ای کامپوزیت و یک مود شیب موج ورق فولاد ضخیم ارتباط داد. محل گپ انرژی ارتعاشات توسط مودهای رزونانس تشدیدگرهای مرحله‌ای کامپوزیتی تعیین می‌شود.

۳-۶- گپ انرژی ارتعاشات در صفحات باریک فراماده الاستیک با تشدیدگرهای محلی

در یک تحقیق توسط هی و هوانگ [۱۳] در دانشگاه تایوان در سال ۲۰۱۸ یک صفحه‌ی فراماده شامل سوراخ‌های متناوبی که روی آن تشدیدگرهایی تعبیه شده است مورد بررسی قرار گرفته است. با مطالعات عددی که در این مدل انجام شده است ثابت شده که برای محدوده‌ی فرکانسی پائین یک گپ انرژی کامل به‌وجود می‌آید. برای بررسی رفتار گپ انرژی در کل صفحه، ابتدا یک مدل ساده شده پیشنهاد شده است که بتوان رفتار دقیق اولین گپ انرژی را در آن مورد بررسی قرار داد و ویژگی‌های اصلی آن را برای محدوده‌های فرکانسی پائین به‌دست آورد. سپس یک واحد واقعی و قابل بررسی از صفحه برای شبیه سازی در روش المان محدود طراحی شده است. صفحه‌ی فراماد تولیدی نه تنها یک گپ انرژی کامل به‌وجود می‌آورد بلکه تطابق بسیار خوبی برای پیش‌بینی خواص این گپ انرژی در حالت محاسباتی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.



شکل ۹ مدل ساده شده و سه بعدی از سلول واحد فراماد طراحی شده [۱۳]

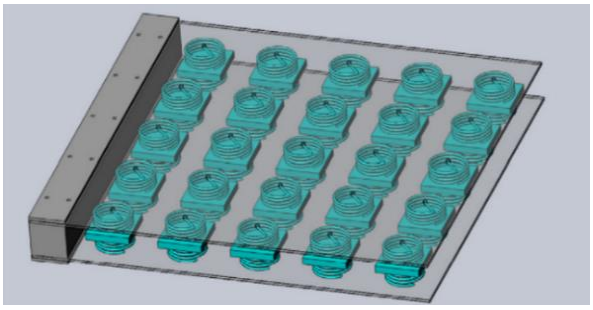


شکل ۱۰ تأثیر (a) ضخامت (b) ابعاد (c) I_x و I_y یا I_x (d) I_y صفحه فراماده روی گپ انرژی [۱۳]

۴- صفحات فراماده صوتی برای جذب امواج الاستیک و دفع ارتعاشات

در یک مقاله که در سال ۲۰۱۴ توسط پنگ و پای [۱۴] در دانشگاه میزوری امریکا انجام شده تکنیک‌های مدلسازی و طراحی مکانیزم‌های کاربردی صفحات فراماده صوتی برای جذب امواج الاستیک و دفع ارتعاشات در ساختار آن نشان داده شده است.

هر یک از صفحات مورد بررسی از دو صفحه‌ی مجزا و مشابه هم (از نظر خواص فیزیکی) با زیرسیستم‌های فنر-جرم-دمپر که بعنوان جاذب‌های ارتعاش محلی عمل می‌کنند تشکیل شده است. برای یک صفحه نامحدود، باند توقف توسط آنالیز پراکندگی[۱] که روی یک سلول آن انجام شده بدست آمده است.

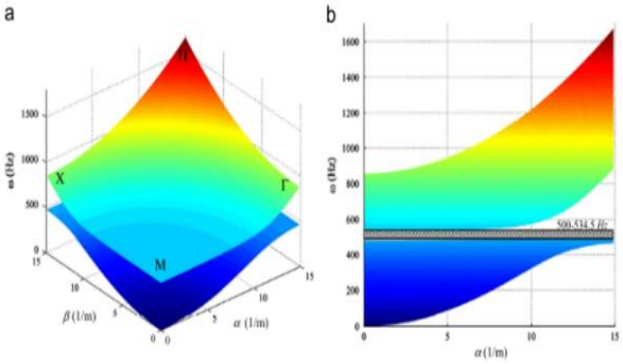


شکل ۱۱ صفحه ساخته شده از فراماده با زیر سیستم جرم و فنر [۱۴]

آنالیز پاسخ فرکانسی مدل کامل المان محدود، نحوه‌ی رفتار باند توقف را نشان می‌دهد که این رفتار توسط آنالیز گذرا[۲] که بر پایه‌ی انتگرال‌گیری عددی مستقیم از معادلات المان محدود می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیرات فرکانس‌های تشدید محلی و نسبت دمپینگ و دمپینگ صفحات، شرایط مرزی و فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی جاذب‌های ارتعاش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تشدید ارتعاش جاذب‌ها با امواج الاستیک تولیدی که حاوی یک نیروی متمرکز اولیه است برای جلوگیری از نیروی برشی اولیه در صفحه، همچنین مستحکم‌تر کردن صفحه و توقف انتشار موج انجام می‌شود.

نتایج عددی، مکان باند توقف که توسط جاذب‌های فرکانس تشدید محلی تعیین شده است را نشان می‌دهد. عرض باند توقف با نسبت جرم کل جاذب به جرم یک سلول افزایش می‌یابد، همچنین افزایش دمپینگ جاذب‌ها بطور مستقیم باعث افزایش عرض باند توقف و کاهش دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس پائین می‌شود (افزایش بیش از حد دمپینگ ممکن است باعث از بین رفتن تأثیر باند توقف شود).



شکل ۱۲ (a) صفحات پراکندگی موج (b) نشان دادن باند توقف (نوار خاکستری رنگ) [۱۴]

۴-۱- فراماده عایق صوت برای پهنای باند مشخص در فرکانس پائین

در تحقیقی در سال ۲۰۱۷ اوه و همکاران [۱۵] در دانشکده مهندسی مکانیک، هوافضای مؤسسه‌ی ملی علم و فناوری اولسان کره جنوبی از یک مدل جدید فراماده صوتی برای جذب ارتعاشات و گسترش باند توقف در پهنای باند مشخص استفاده کرده‌اند.

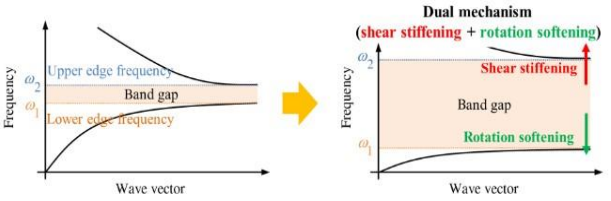
رسیدن به باند توقف در طول یک پهنای باند در فرکانس پائین همچنان به‌عنوان یک چالش عظیم در علم تلقی می‌شود. (با توجه به تمام تلاش‌ها در زمینه فراماده و دیگر تکنولوژی‌های نو ساخته)

در این مقاله، در مکانیزم ارائه شده برای رسیدن به باند توقف در فرکانس پائین، سعی بر سخت‌تر کردن شرایط ایجاد برش و راحت‌تر کردن دوران قطعه شده است.

[۱] Dispersion analysis
[۲] Transient analysis

شکل ۱۳ مدل ارائه شده برای ایجاد گپ انرژی در پهنای باند (ادغام فراماده صفحه‌ای کاهش دهنده دوران و فراماده تیری سفت کننده برشی منجر به فراماده دو منظوره شده‌است) [۱۵].

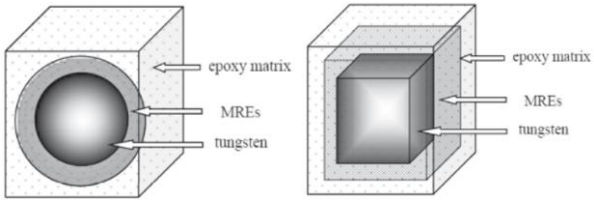
طی مطالعات و محاسبات عددی صورت گرفته و آزمایشاتی که انجام شده است یک مکانیزم فیزیکی اساسی منتشر شده که تأثیر این فرامواد بر حفاظت از ارتعاشات در محدوده فرکانسی ۲۳۵ هرتز تا ۴۵۲۰ هرتز بررسی و تأیید شده است.



شکل ۱۴ تاثیر کاهش نیروی برشی و افزایش نیروی دورانی بر گپ انرژی [۱۵]

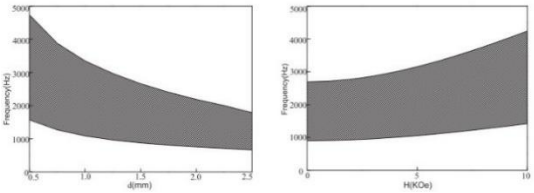
۴-۲- دفع ارتعاشات فرامواد صوتی با تشدید محلی سه بعدی توسط الاستومرهای مغناطیسی

در یک تحقیق در سال ۲۰۱۸ توسط ژو و همکارانش [۱۶] در مؤسسه علم و فناوری گواندونگ چین از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال برای پوشش سه بعدی یک تشدیدگر محلی فراماده صوتی استفاده شده است. به‌عبارت دیگر فرماده صوتی به‌عنوان هسته و این الاستومر پوسته‌ی آن می‌باشد.



شکل ۱۵ یک واحد فراماده با هسته مکعبی و کروی(از خارج به داخل پوشش اپوکسی، فراماده الاستومر مگنتورئولوژیکال[1] و تنگستن) [۱۶]

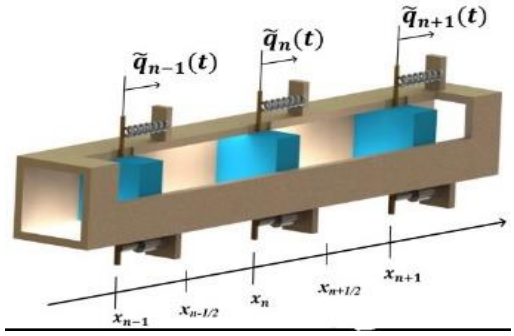
برای بررسی ساختار باند الاستیکی، نحوه‌ی انتقال و مودهای ارتعاشی از روش المان محدود برای موج الاستیکی ورودی استفاده شده است. نتایج نشان داده که موقعیت مرکز و عرض گپ انرژی الاستیک این فراماده می‌تواند با استفاده از میدان مغناطیسی کنترل شود، همچنین می‌توان با تغییر ضخامت الاستومر موقعیت مرکز و عرض گپ انرژی موردنظر را تنظیم کرد. از این روش می‌توان برای طراحی جاذب ارتعاش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال استفاده کرد.



شکل ۱۶ تاثیر تغییر ضخامت روکش الاستومر و میدان مغناطیسی بر عرض گپ انرژی [۱۶]

۴-۳- دفع ارتعاشات طولی در فرکانس پائین با استفاده از فرامواد صوتی

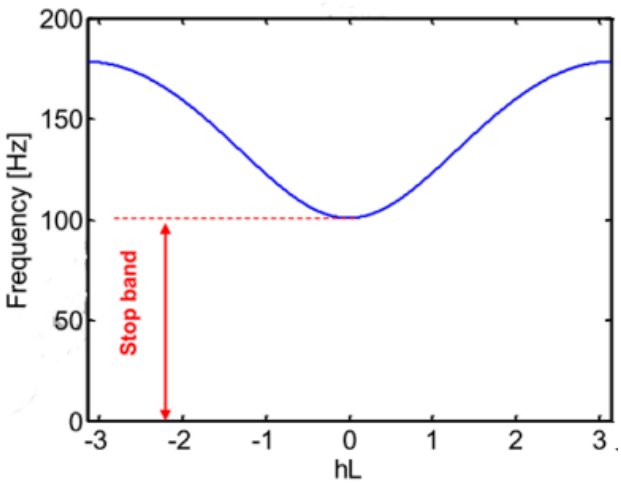
در سال ۲۰۱۸ لی و همکاران [۱۷] در دانشگاه آژو کره جنوبی برای دفع ارتعاشات طولی در محدوده فرکانسی پائین یک مدل علمی از فرامواد صوتی پیشنهاد کرده‌است که با استفاده از روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. یک آنالیز مشترک با استفاده از مدل علمی که شامل سیستم جذب ارتعاش مجزا و یک مجرای کوتاه است و به‌صورت متناوب تکرار شده اجرا شده است. روش ماتریس انتقال و قضیه بلاک-فلوکوت برای محاسبه فاز بلاک سلول واحد فراماده صوتی انجام شده است. گپ انرژی پیش‌بینی شده از فاز بلاک محاسبه شده از فرکانس صفر شروع می‌شود و تا فرکانسی که دارای مقدار انتقال کمتر از یک می‌باشد ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۱۷ فراماده آکوستیک پیشنهادی [۱۷]

تأثیرات پارامترهای سلول واحد روی حداکثر مقدار فرکانس گپ انرژی و همچنین رابطه پراکندگی و منحنی‌های چگالی جرم مؤثر فرامواد صوتی، فیزیک پایه آن را توضیح می‌دهد.

[1] MRE metamaterial magnetorheological elastomer:



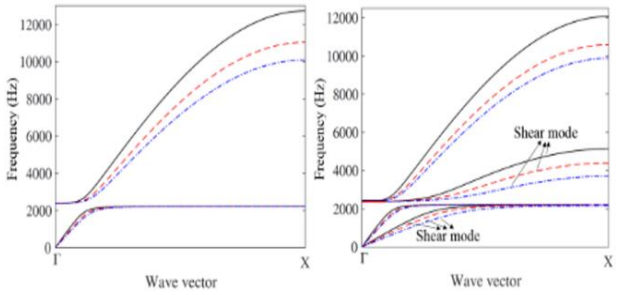
شکل ۱۸ گپ انرژی ایجاد شده در فراموا آکوستیک پیشنهادی و میزان باند توقف [۱۷]

می‌توان به‌جای یک سیستم ارتعاشی مجزا از یک سیستم ارتعاشی پیوسته در مدل‌های حقیقی استفاده کرد. آنالیز المان محدود و تست آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی دفع ارتعاشات و عملکرد موردنظر انجام شده است. نتایج نشان داده استفاده از این فراموا برای دفع ارتعاشات طولی بین دو قسمت مکانیکی مؤثر بوده است.

۴-۴- امواج الاستیک و گپ انرژی ارتعاشات در فراموا صوتی دو بعدی

در سال ۲۰۱۸ ژانگ و همکاران [۱۸] در دانشگاه هوهای چین مدل جدیدی از فراموا صوتی که وظیفه جذب ارتعاشات را بر عهده دارند، مورد بررسی قرار داده‌اند.. فراموا صوتی دو بعدی دارای سیستم‌های جرم و فنر مجزا هستند که وظیفه جذب ارتعاشات وارد به جسم را دارند. برای مشخص کردن مکانیزم گپ انرژی در این فراموا یک سیستم متقارن نامحدود مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تأثیر عدم تقارن فیزیکی‌ای که به‌دلیل ضریب سختی مطلق فنرهای متصل به سلول‌ها به‌وجود آمده است بررسی شده است. اگرچه این عدم تقارن نمی‌تواند باعث تغییر پهنای گپ انرژی شود ولی می‌تواند تغییر فاز سرعت و به‌وجود آمدن مود برشی را از طریق محاسباتی ثابت کند.

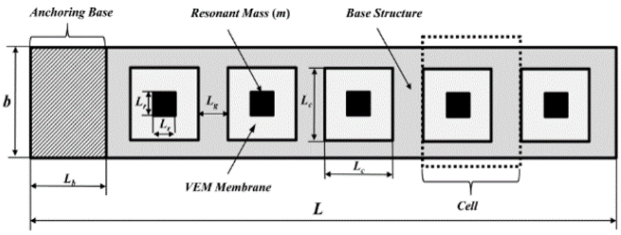
برای مطالعه وضعیت ارتعاش و ویژگی‌های آن در فراموا صوتی، جرم مؤثر هر سلول واحد درنظر گرفته شده است. ویژگی‌های جرم مؤثر در تشدیدگر یگانه و تشدیگرهای چندگانه که تحت تحریک هارمونیک قرار داده شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است همچنین تأثیر تعداد سلول‌های واحد، تعداد تشدیدگرهای چندگانه در هر سلول واحد، درجه‌بندی تشدیدگرها در مدل فراموا صوتی ایجاد شده برای جذب ارتعاشات توسط آنالیز پاسخ فرکانسی بررسی شده‌اند.



شکل ۱۹ تابع پاسخ فرکانسی با ضریب سختی متفاوت [۱۸]

۴-۵- ارتعاش تیرهای فراموا با تشدید محلی دوره‌ای

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۴ توسط نوح و همکاران [۱۹] در دانشگاه مریلند امریکا مدل خاصی از تیرهای متشکل از فراموا مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه یک تیر فراموا از کنارهم قراردادن تعدادی سلول متناوب که دارای تشدیدگر محلی هستند تشکیل شده و هر یک از این سلول‌ها شامل یک ساختار پایه با تعداد متعددی حفره است که با یک پوسته‌ی ویسکوالاستیک پر شده است که می‌تواند یک وزن کوچکی را تحمل کند (پایه‌ی تشدیدگر محلی).



شکل ۲۰ تیر فراموا آکوستیک با تشدیدگر محلی متناوب شامل تکیه‌گاه، جرم مرتعش و غشاء ویسکو الاستیک[1] [۱۹]

این ساختار خاص از تیر متشکل از فراموا دارای رفتار خاصی در فرکانس‌های پائین در باند توقف می‌باشد. با استفاده از یک مدل المان محدود، مودهای ارتعاش، پاسخ فرکانسی و باند توقف اشکال مختلف تیر با تشدیدگرهای محلی را می‌توان شبیه سازی کرد و مورد بررسی قرار داد.

مدل المان محدود ایجاد شده توسط مدل تجربی اعتبارسنجی می‌شود، بدین صورت که تیر از فرکانس ۱۰ هرتز تا ۵۰۰۰ هرتز مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده نشان

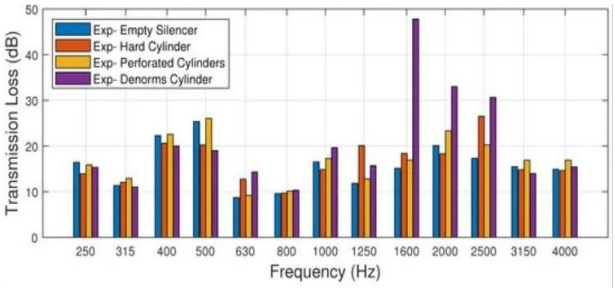
[1] Viscoelastic Material

می‌دهد پاسخ‌های مدل المان محدود شباهت زیادی به آزمایش‌های تجربی انجام شده دارد. نتایج برای سه مدل تیر ساده، تیر با حفره های متعدد و تیری با حفره‌های پر شده با تشدیدگرهای محلی متناوب به‌دست آمده است. تمام نتایج به این نکته تأکید دارند که تیرهای متشکل از فراموا پتانسیل بسیار خوبی برای تضعیف ارتعاشات و افزایش باند توقف برای فرکانس‌های پائین دارند. از نتایج بدست آمده می‌توان به این نکته پی برد که تیرهای فراموا در تضعیف و فیلتر کردن ارتعاشات در فرکانس‌های پائین بسیار مؤثرتر از تیرهای ساده و متناوب با همان اندازه و وزن می‌باشند.

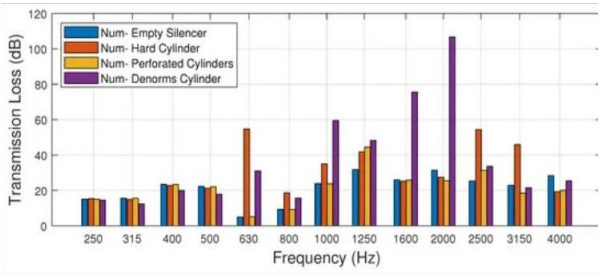
۵- کاربرد فراموا در صنعت خودرو

با تغییر روند برقی شدن خودرو، تراز کلی نویز در خودرو به تدریج کاهش یافته‌است. مشکل صدای فرکانس پایین در خودرو که پیش از این نادیده گرفته می شد، روز به روز برجسته تر می شود. برای حل مشکل صدای فرکانس پایین خودرو، ترکیبی از آزمایش‌های خودروی واقعی و تحلیل شبیه‌سازی انجام می‌شود. در طول تست، مشخص شده که صدای غرش با فرکانس نسبتاً پایین در خودرو وجود دارد که ناشی از تشعشع ساختاری صدای لرزش درب صندوق است. بنابراین، برای حل این مشکل، از یک فراماده آکوستیکی با وزن سبک و کوچک شده بر اساس اصل رزونانس محلی کریستال های فونونیک طراحی شده‌است. نتایج آزمایش تجربی خودرو نشان داده که پس از اتصال فراماده آکوستیک طراحی شده، تراز فشار صدای فرکانس پایین در جلو و عقب خودرو به ترتیب ۲ dB (A) و ۲,۳ dB (A) کاهش یافته و کیفیت صدای نویز داخلی بهبود یافته است. حداکثر تراز فشار صدا در گوش راست راننده در خودرو در فرکانس ۳۵ هرتز اتفاق افتاده‌است. علاوه بر آن، راننده و سرنشینان احساس کرده‌اند که صدای غرش نسبتاً واضحی در خودرو وجود دارد و از طریق فیلتر سیگنال‌های جمع‌آوری‌شده، تأیید شده که صدا با فرکانس ۳۵ هرتز علت اصلی تولید نویز فرکانس پایین است. از طریق تحلیل شبیه‌سازی المان محدود فرامواد‌ی طراحی و تحلیل شده که با استفاده از آن می‌توان نویز در فرکانس ۳۵ هرتز ناشی از لرزش ورقه فلزی درب صندوق را کاهش داد [۲۰].

دیری و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۲ با استفاده از فراموا میزان کاهش تراز صوت مافلر یک خودروی تجاری را مورد بررسی قرار داده‌اند که این بررسی شامل شبیه سازی و تحلیل عددی در نرم‌افزار کامسول و اعتبارسنجی آن به روش تجربی توسط یک نمونه پرینت سه بعدی فراماده است. طبق این مطالعه یک مانع مهم برای استفاده عملی از فراموا صوتی، نیاز به استراتژی‌های مدل‌سازی کم هزینه و کارآمد در مرحله طراحی است. نتایج نشان داده با بکارگیری فراموا درون مافلر اگزوز یک خودرو افت انتقال صوت ۴۰ دسیبل در فرکانس ۱۵۰۰ هرتز قابل دستیابی است همچنین این تحقیق نشان داده است که فراموا آکوستیک را می توان در تنظیمات عملی، مانند صدا خفه کن خودرو، برای بهبود عملکرد کلی کاهش صدا استفاده کرد. نتایج تجربی و عددی و مقایسه افت انتقال برای طراحی‌های مختلف در شکل ۲۱ قابل مشاهده است. مدل تحلیلی توصیف شده پتانسیل ابزارهای طراحی کم هزینه مرتبط صنعتی را نشان می دهد [۲۱].



(الف)



(ب)

شکل ۲۱ الف مقایسه نتایج تجربی افت انتقال صوت برای سایلنسر خالی (آبی)، استوانه سخت (قرمز)، استوانه متخلخل (زرد)، استوانه طراحی شده برای کاهش نویز فراموا (بنفش) ب مقایسه نتایج عددی افت انتقال صوت برای سایلنسر خالی (آبی)، استوانه سخت (قرمز)، استوانه متخلخل (زرد)، استوانه فراموا (بنفش) [۲۱]

در سال ۲۰۲۲ ابراهیمی نژاد و همکاران [۲۲] تاثیر محل ورودی و خروجی به مافلر، هندسه و طرح سوراخ‌های صفحات متخلخل به شکل فراموا داخل مافلر را بر میزان افت انتقال صوت مافلرهای یک و دو محفظه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ابتدا با ثابت نگه داشتن پارامتر طرح و اندازه سوراخ و محل ورودی تاثیر موقعیت خروجی مافلر بر افت انتقال بررسی شده سپس تاثیر موقعیت ورودی با در نظر گرفتن طرح و اندازه سوراخ، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داده در حالت تک محفظه و سوراخ دایره‌ای ۷۵٪، در باند گسترده‌ای از فرکانس

افت انتقال ۵۸ دسیبل و در سوراخ مستطیلی ۷۵٪، ۶۷ دسیبل است همچنین برای مافلر دو محفظه میزان افت انتقال برابر با ۷۸ دسیبل در بازه گسترده تری از فرکانس است. تغییر محل ورودی و خروجی مافلر نیز در افت انتقال تاثیر گذار است و در کاربردهایی که حجمی محدود برای بکارگیری مافلر در دسترس است محاسبات مربوطه بایستی انجام گیرد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تحقیقات پیشین مرتبط با موضوع فراماواد آکوستیکی و الاستیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که اساساً در پژوهش‌های پیشین، تأثیر و کاربرد این مواد در سیستم‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از فراماواد آکوستیکی یعنی مواد مصنوعی ساخته شده از سلولهای واحد شامل ارتعاش کننده‌های محلی با ابعادی کوچکتر از طول امواج صوتی مورد نظر می‌توان دامنه امواج صوتی را در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰۰ هرتز بصورت مؤثر کاهش داد همچنین تحقیقات نشان داده در حوزه خودرو با استفاده از فراماواد می‌توان تراز فشار صدا در فرکانس ۳۵ هرتز ناشی از درب صندوق عقب را حداکثر ۲/۳ دسیبل کاهش داد. با افزایش درجات آزادی سلول‌ها و یا افزایش دمپینگ آن‌ها می‌توان گپ انرژی را افزایش داد. طبق نتایج می‌توان گفت با استفاده از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال برای پوشش سه بعدی یک تشدیدگر محلی می‌توان فرامواد برای کاهش تراز صوت ساخت. برای طراحی فراماده از روش‌های عددی و تجربی در کنار هم استفاده می‌شود. در دهه اخیر، تلاشهایی جهت افزایش کاربرد این مواد انجام شده است و نویسندگان در مقالات خود کاربردهای متنوعی برای بهبود مسائل آکوستیکی مختلف مانند کنترل صدا زیر آب، جاذب یا عایق صدا در هوا، لرزش ساختاری و کنترل ضربه بهره برده‌اند. همچنین از فراماده در کاهش دمپ تیرها نیز استفاده شده‌است. کاربرد و طراحی فراماواد آکوستیکی مناسب با نیاز مسئله زمینه مناسبی برای کارهای آتی است. اکثر نویسندگان از این مواد در زمینه‌های متفاوت همچون میرایی، جذب، کنترل و کاهش نویز استفاده کرده‌اند، از سویی دیگر محققان پیش‌بینی‌هایی نیز از آینده این مواد در مطالعه خود ارائه داده‌اند. با توجه به روند افزایش تحقیق در این زمینه پیش‌بینی می‌شود کاربرد فراماواد و طراحی‌های نوین ارتعاش کننده‌های محلی با توجه به نیاز صنعت برای کاهش نویز و ارتعاشات در صنعت‌های مختلف ادامه خواهد داشت.

۷- مراجع

[1] Sachan, M., and Majetich, S., “DARPA Meta-Materials Program Report”, May, (2005).

[2] Liu, S., “DARPA Meta-Materials Program Report”, May, (2005).

[3] Pendry, J. B., “Negative refraction makes a perfect lens”, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 85, No. 18, pp. 3966, (2000).

[4] Pendry, J. B., “Negative refraction”, *Contemp. Phys.*, Vol. 45, No. 3, pp. 191–202, (2004).

[5] Tanaka, T., Ishikawa, A., and Kawata, S., “Unattenuated light transmission through the interface between two materials with different indices of refraction using magnetic metamaterials”, *Phys. Rev. B*, Vol. 73, No. 12, pp. 125423, (2006).

[6] Tanaka, T., “Plasmonic metamaterials produced by two-photon-induced photoreduction technique”, *J. Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 152–156, (2008).

[7] Li, J., and Chan, C. T., “Double-negative acoustic metamaterial”, *Phys. Rev. E*, Vol. 70, No. 5, pp. 55602, (2004).

[8] Fang, X., Chuang, K.C., Jin, X. and Huang, Z., 2018. "Band-gap properties of elastic metamaterials with inerter-based dynamic vibration absorbers", *J. Applied Mechanics*, Vol. 85, No. 7, p.071010.

[9] Sun, H., Du, X., and Pai, P. F., “Theory of metamaterial beams for broadband vibration absorption”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 21, No. 11, pp. 1085–1101, (2010).

[10] Zhu, R., Liu, X. N., Hu, G. K., Sun, C. T., and Huang, G. L., “A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression”, *J. Sound Vib.*, Vol. 333, No. 10, pp. 2759–2773, (2014).

[11] E. D. Nobrega, F. Gautier, A. Pelat, and J. M. C. Dos Santos, “Vibration band gaps for elastic metamaterial rods using wave finite element method,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 79, pp. 192–202, (2016).

[12] Li, S., Dou, Y., Chen, T., Wan, Z., Huang, J., Li, B. and Zhang, F.,, “Evidence for complete low-frequency vibration band gaps in a thick elastic steel metamaterial plate”, *Mod. Phys. Lett. B*, Vol. 33, No. 4, (2019).

[13] He J.-H., and Huang, H.-H., “Complete vibrational bandgap in thin elastic metamaterial plates with periodically slot-embedded local resonators”, *Arch. Appl. Mech.*, Vol. 88, No. 8, pp. 1263–1274, (2018).

[14] Peng H., and Frank Pai, P., “Acoustic metamaterial plates for elastic wave absorption and structural vibration suppression”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 89, pp. 350–361, (2014).

[15] Oh, J. H., Qi, S., Kim, Y. Y., and Assouar, B., “Elastic Metamaterial Insulator for Broadband Low-Frequency Flexural Vibration Shielding”, *Phys. Rev. Appl.*, Vol. 8, No. 5, (2017).

[16] Xu, Z., Tong, J., and Wu, F., “Magnetorheological elastomer vibration isolation of tunable three-dimensional locally resonant acoustic metamaterial”, *Solid State Commun.*, Vol. 271, pp. 51–55, (2018).

[17] Lee, S., Ahn, C. H., and Lee, J. W., “Vibro-acoustic metamaterial for longitudinal vibration suppression in a low frequency range”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 144, pp. 223–234, (2018).

[18] An, X., Fan, H., and Zhang, C., “Elastic wave and vibration bandgaps in two-dimensional acoustic metamaterials with resonators and disorders”, *Wave Motion*, Vol. 80, pp. 69–81, (2018).

[19] Nouh, M., Aldraihem, O., and Baz, A., “Vibration characteristics of metamaterial beams with periodic local resonances”, *J. Vib. Acoust.*, Vol. 136, No. 6, pp. 061012, (2014).

[20] Liao, Y., Huang, H., Chang, G., Luo, D., Xu, C., Wu, Y., Tang, J., "Research on low-frequency noise control of automobiles based on acoustic metamaterial", *Materials*, Vol. 15, pp. 3261, (2022).

[21] Deery, D., Flanagan, L., O’Brien, G., Rice, HJ., Kennedy, J., “Efficient modelling of acoustic metamaterials for the performance enhancement of an automotive silencer”, *Acoustics*, Vol. 4(2), pp. 329-344, (2022).

[22] Ebrahimi-Nejad, S., Rahimi, D., Kheybari, M., Majidi-Jirandehi, AA., “Effects of inlet-outlet positioning, muffler geometry, and baffle design on vehicle muffler performance for desired sound transmission loss”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: *Journal of Automobile Engineering*, March (2022).