

طراحی فراماده زیرسطحی جهت میراسازی موج برشی لرزه‌ای

رضا خواجوی^{۱*} و زهرا سیدی^۲

^۱ استادیار مرکز زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مرکز زمین‌لرزه‌شناسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱)

چکیده

این پژوهش بر آن است تا با طراحی فراماده‌های با ابعاد کوچک و توانایی حمل و اجرای ساده، امواج برشی مخرب را پیش از رسیدن به سازه‌های هدف میرا کند. فرض منطقی مطالعه حاضر این است که در زمین‌لرزه‌ها، بخش درخور توجهی از آسیب به ساختمان ناشی از تحریک مد نخست ارتعاشی است و چنانچه بسامد مد نخست ارتعاشی ساختمان از محتوای بسامدی تحریک ورودی حذف شود، پدیده تشدید در این مد رخ نخواهد داد و انتظار می‌رود آسیب به ساختمان کاهش چشمگیری یابد. در این پژوهش، با هدف محافظت از ساختمان‌های معمولی دو تا شش طبقه، بازه بسامدی مد نخست ارتعاشی بر پایه روابط تجربی ارائه شده در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان تعیین می‌شود سپس با بهره‌گیری از رابطه پیشنهادی بهبودیافته پاشیدگی برای فراماده یک‌بعدی، هندسه و جنس تشدیدگر پایه فراماده چنان طراحی می‌شود که بازه ایست فراماده ساخته شده از آرایش شبکه‌های این تشدیدگر منطبق بر بازه بسامدی هدف شود. برای سهولت در اجرا، کوشش شده است در طراحی فراماده، ابعاد تشدیدگر پایه بزرگ نباشد. فراماده طراحی شده برای کارگذاری در خاک رس متوسط به‌صورت استوانه‌های با قطر و درازای ۰/۵ متر از بتن سبک و مقاوم است که در آن، استوانه‌های سربی درون یک سیال پرکننده میانی قرار دارد. به کمک مدل ساده شده معادل پیوسته فراماده پیشنهادی، عملکرد آن در برابر موج برشی با بسامد واقع در نوار ایست هدف بررسی شده است. بر پایه این بررسی، فراماده پیشنهادی می‌تواند دامنه امواج برشی زلزله را به سرعت کاهش دهد. این فراماده می‌تواند جهت حفاظت از ساختمان‌های شهری نباشده در نزدیکی گسل‌ها به کار رود.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لرزه، فراماده، مد ارتعاشی، میرایی، نوار ایست

۱ مقدمه

زمین لرزه طی فرایند پنج مرحله‌ای جریان همرفتی گوشته، جابه‌جایی صفحات زمین‌ساختی، لغزش گسل، انتشار امواج لرزه‌ای درون پوسته و لرزش و ارتعاش سازه‌ها رخ می‌دهد (اشتاین و وی‌سشن، ۲۰۰۳). آشکار است که دخالت در روند جریان‌های همرفتی گوشته و جابه‌جایی‌های زمین‌ساختی در توان بشر نیست. دسترسی به نقاط در معرض تنش روی سطوح گسلی و دستکاری آنها نیز خارج از توان فناوری‌های کنونی است. البته، گزارش‌هایی تأیید نشده در این زمینه وجود دارد (گرگرسن، ۲۰۱۸)؛ بنابراین تاکنون تلاش پژوهشگران برای کنترل پدیده زلزله، تنها معطوف به دو مرحله پایانی این فرایند بوده است. این دو مرحله به سبب دسترسی آسان بشر به سازه‌ها و نقاط نزدیک به سطح زمین، برای کنترل زلزله مناسبند. پژوهش‌های فراوانی در زمینه کنترل رفتار ارتعاشی سازه‌ها در برابر زلزله/انفجارهای زیرسطحی و بهسازی لرزه‌ای با روش‌هایی چون افزایش شکل‌پذیری، کاهش جرم و نامنظمی سازه‌ها و استفاده از فناوری‌های نوینی مانند جداسازی لرزه‌ای، میراگرهای لزج و جرمی و... صورت پذیرفته است (داتا، ۱۳۹۱)، اما پژوهش‌ها در زمینه کنترل امواج لرزه‌ای در زیر سطح پیشینه چندانی ندارد. به‌تازگی و با پیدایش فناوری‌های نوین و ابزارها و سخت‌افزارهای ژئوتکنیکی، کنترل امواج لرزه‌ای به‌ویژه در نزدیکی سطح زمین، راهکاری دست‌یافتنی شده است.

فناوری کنترل امواج، نخست با بلورهای فوتونی میسر شد و به پیشرفت‌های گسترده‌ای در فناوری‌های بیسیم، الیاف نوری و ریزموج انجامید (انقطاع و زیولکوفسکی، ۲۰۰۶). پژوهشگران با نسخه‌برداری از این شیوه کنترل فوتون‌ها، بلورهای فوتونی را برای کنترل فوتون‌ها (امواج مکانیکی) طراحی کردند و به‌کار گرفتند (مارتینز‌سالا و همکاران، ۱۹۹۵ و سوخویچ و همکاران، ۲۰۰۹). این بلورها اغلب با هدف ایجاد نوار ایست بسامدی مناسب برای کنترل انتشار

امواج صوتی با دامنه بسامدی کیلوهرتز تا مگاهرتز طراحی شدند و بعدها با پیشرفت فناوری‌های ساخت در مقیاس نانو، جهت کنترل انتقال گرما نیز به‌کار رفتند.

طی سالیان اخیر، پژوهش‌هایی چند در این زمینه انجام شده است که بیشتر آنها می‌کوشند روش‌های کنترل امواج صوتی و گرمایی را که خود برگرفته از روش‌های پیشرفته کنترل امواج الکترومغناطیسی و نور به کمک مواد مصنوعی هستند (ساریکف و شالواف، ۲۰۰۷)، برای امواج لرزه‌ای بیامانند. یادآوری می‌کند که امواج لرزه‌ای، صوتی و گرمایی، همگی از گونه امواج مکانیکی، البته با بسامدهای متفاوت هستند (مالدون، ۲۰۱۳). آن بخش از امواج لرزه‌ای که سبب تخریب ساختمان‌ها و دیگر سازه‌های روسطحی و زیرسطحی می‌شود، اغلب در دامنه بسامدی ۰/۱ تا ۱۰ هرتز قرار دارد. بسامدهای طبیعی بیشتر سازه‌ها در این دامنه بسامدی است؛ از این رو امواج لرزه‌ای با چنین محتوای بسامدی، در برخورد با سازه سبب پدیده تشدید می‌شوند. کنترل و تضعیف امواج با بسامدهای کم، به‌ویژه بسامدهای زیرصوتی و لرزه‌ای، با چالش‌های فراوانی روبه‌روست. میرایی ذاتی مواد در این دامنه بسامدی بسیار اندک است و حتی بلورهای فوتونی (چپیشی منظم از جرم‌ها) با مقیاس‌های ساخت معمولی نیز نمی‌توانند این دامنه بسامدی را میرا کنند. در بلورهای فوتونی، دوره تناوب ناهمگنی باید از همان مرتبه طول موج فوتون‌هایی باشد که باید کنترل شوند، ولی در فرامواد، مقیاس طول ساختار می‌تواند کوچک‌تر باشد؛ یعنی اگر هدف، کنترل طول موج‌های بزرگی از طیف امواج مکانیکی مانند زلزله باشد، استفاده از فرامواد مناسب‌تر است؛ زیرا طول تناوب ناهمگنی مورد نیاز بلورهای فوتونی برای کنترل این امواج، بسیار بزرگ خواهد بود. هزینه‌های اجرایی ساخت چنین میراگرهای لرزه‌ای زیرسطحی که بر پایه نگره انتشار موج در بلورهای فوتونی کار می‌کنند، بسیار زیاد است و مقرون به صرفه نیست.

با طراحی تشدیدگرهای ویژه استوانه‌ای شکل توخالی سوراخ‌دار هلمهولتز نشان دادند برای کاهش بزرگای زلزله به اندازه $\Delta M = M_f - M_i$ و M_f به ترتیب بزرگای موج‌های لرزه‌ای ورودی و خروجی هستند)، باید فراماده پیشنهادی به صورت آرایه‌ای از استوانه‌هایی با حجم داخلی 1 m^3 ، ضخامت ۱۰ سانتیمتر و سوراخ‌هایی به قطر حدود 10^{-3} سانتیمتر در پهنایی برابر با $\Delta X = \frac{\ln 10}{2\pi n} \lambda \Delta M = \frac{0.366}{n}$ باشد. بنا به پژوهش الفورد و همکاران (۲۰۱۱)، درهم‌گذاری شمار بیشتری از تشدیدگرهای هلمهولتز، سبب انتقال نوارهای ایست به بسامدهای کمتر و افزایش تعداد و پهنای نوارهای ایست خواهد شد. بخش دوم طراحی فرامواد، مهندسی چینش و آرایش تشدیدگرهاست. چنین چینشی شامل انواع الگوهای هندسی جانشانی تشدیدگرها یعنی الگوهای شبکه‌ای منظم و فرکتالی (ما و همکاران، ۲۰۱۴)، تغییر در فواصل میان تشدیدگرها (در الگوی شبکه‌ای) و گاه تغییر در جنس تشدیدگرها در طول شبکه (کرودل و همکاران، ۲۰۱۵) و... است.

پژوهش پیش رو بر آن است با بهسازی مدل ساده یک‌بعدی تشدیدگر در آرایش شبکه‌ای منظم فراماده، امکان میراسازی امواج برشی زلزله را در بازه بسامدی مربوط به مدهای نخست ارتعاشی ساختمان‌های دو تا شش طبقه فراهم کند. بازه بسامدی هدف، بر مبنای رابطه تجربی پیشنهادی مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران تعیین می‌شود. تلاش شده است تا ابعاد تشدیدگر پایه در این فراماده در حد امکان کوچک باشد و فراتر از ۰/۵ متر نرود تا امکان اجرای آن به‌سهولت فراهم شود. این کار، همان‌طور که در ادامه خواهد آمد، مستلزم اختلاف زیاد در جرم‌های لایه‌های تودرتوی تشدیدگر پایه فراماده است.

۲ روش پژوهش

در این پژوهش، فراماده لرزه‌ای جهت محافظت سازه‌های دو تا شش طبقه در برابر امواج برشی زلزله طی سه گام

این چالش‌ها، پژوهشگران را بر آن داشته است تا در کنترل امواج لرزه‌ای، به جای بلورهای فونونی، از فرامواد (چینشی از تشدیدگرها) بهره جویند. فرامواد مانند بلورهای فونونی، ساختاری ناهمگن و متناوب دارند، اما نه از جرم‌هایی ساده، بلکه از جزءهایی با هندسه مناسب (تشدیدگرهای بهینه‌شده). این مواد می‌توانند امواج با طول موج‌های بزرگ‌تر از طول تناوب و مقیاس جزءهای سازنده خود (تشدیدگرها) را کنترل کنند. فرامواد مانند بلورهای فونونی از چینش متناوب جزءهای ناهمگن ساخته می‌شوند، اما برخلاف بلورهای فونونی، در فرامواد، هندسه و ساختار درونی تشدیدگرها نیز اهمیت دارد و توانایی آنها در کنترل موج با طول موج‌های بلندتر نیز برخاسته از همین هندسه خاص آنهاست؛ این توانایی در بلورهای فونونی موجود نیست. جزءهای هندسی متناوب سازنده فراماده، نوعی تشدیدگر بهینه‌شده هستند که امواج با بسامدهای نزدیک به بسامد طبیعی‌شان را تشدید می‌کنند. از جمله تشدیدگرهای مکانیکی پر کاربرد، تشدیدگر هلمهولتز و split-ring است. طبق پاره‌ای گزارش‌ها، میراسازی امواج صوتی در محدوده بسامدی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز، در بعضی از فراماده‌ها به‌خوبی و تا حدود ۹۹ درصد انجام پذیرفته است (می و همکاران، ۲۰۱۲)؛ با این حال، مطالعات در زمینه طراحی فرامواد مناسب که میرایی را در بسامدهای زیرصوتی فراهم سازند، همچنان ادامه دارد.

طراحی فرامواد بیشتر در دو بخش دنبال می‌شود. بخش نخست و مهم، طراحی تشدیدگرهای سازنده فراماده است؛ برای نمونه، چوآیی و همکاران تشدیدگر مکعبی بتنی با یک کره آهنی داخلی را پیشنهاد کردند که با شش دستک آهنی یا لاستیکی به حجم بیرونی بتن متصل می‌شد. با کنار هم قرار دادن تعدادی از این تشدیدگرها که قطر کره درونی آن حدود ۷۵ سانتیمتر است، منطقه مورد نظر در برابر امواج لرزه‌ای با بسامدهای بین ۱۰ تا ۵۰ هرتز محافظت می‌شود (آشوی و همکاران، ۲۰۱۶). کیم و داس (۲۰۱۳)

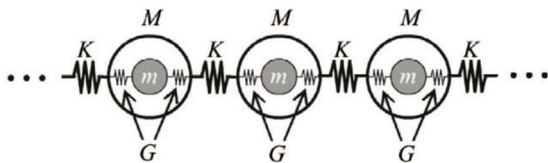
بسامد زاویه‌ای (ω) در حدود ۱۰ تا ۲۰ رادیان بر ثانیه خواهد بود. به این ترتیب، به دنبال طراحی فراماده‌ای خواهیم بود که این بازه بسامدی در محدوده نوار ایست آن قرار گیرد.

۲-۲ بهینه‌یابی یک‌بعدی فراماده

رابطه پاشیدگی مدل ساده‌ای از یک فراماده یک‌بعدی با آرایش متناوبی از تشدیدگرهایی ساده مانند شکل ۱ به صورت زیر گزارش شده است (کرون و ژانگ، ۲۰۰۷):

$$\omega^2 \left(M + \frac{m\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) = 4K \sin^2 \left(\frac{ka}{2} \right) \quad (۳)$$

که ω بسامد زاویه‌ای، k عدد موج و a فاصله میان جرم‌هاست. هر تشدیدگر از پوسته‌ای به جرم M و هسته‌ای به جرم m تشکیل شده است که با فنرهایی با ثابت K به هم متصل شده‌اند و در فاصله a از یکدیگر قرار دارند. اگر G سختی فنرهای داخلی هر تشدیدگر باشد، آنگاه $\omega_0 = \sqrt{2G/m}$ است.



شکل ۱. مدل جرم-فنر یک‌بعدی فراماده دو جرمی (کرون و ژانگ، ۲۰۰۷).

در این پژوهش، با تعریف متغیر $\alpha_M = m/M$ برای نسبت جرم هسته درونی به جرم پوسته بیرونی، $\alpha_K = 2G/K$ برای نسبت سختی فنر درونی به سختی فنر بیرونی و $\omega_M = \sqrt{K/M}$ برای بسامد تشدید جرم بیرونی و با اندکی ساده‌سازی ریاضی، رابطه پاشیدگی (۳) به صورت زیر بازآرایی می‌شود:

$$\omega^2 = \omega_M^2 \left(\alpha_{KM} + 2 \sin^2 \left(\frac{ka}{2} \right) \pm \sqrt{A} \right) \quad (۴)$$

$$A = \alpha_{KM}^2 + 2 \left(\alpha_K - \frac{\alpha_K}{\alpha_M} \right) \sin^2 \left(\frac{ka}{2} \right) + 4 \sin^4 \left(\frac{ka}{2} \right),$$

پیشنهادی زیر طراحی می‌شود:

(۱) تعیین بازه بسامدی نوار ایست هدف؛

(۲) بهینه‌یابی یک‌بعدی فراماده؛

(۳) طراحی سه‌بعدی فراماده.

در ادامه، این سه گام به تفصیل توضیح داده می‌شوند.

۱-۲ تعیین بازه بسامدی نوار ایست هدف

معمولاً در زمین لرزه‌ها، بخش درخور توجهی از آسیب به ساختمان ناشی از تحریک مد نخست ارتعاشی است. به عبارت دیگر، چنانچه بسامد مد نخستین ارتعاشی ساختمان از محتوای بسامدی تحریک ورودی به کمک میراسازی حذف شود، پدیده تشدید در این مد رخ نخواهد داد و انتظار می‌رود آسیب وارد بر ساختمان کاهش چشمگیری یابد.

دوره تناوب طبیعی ساختمان در مد نخست از رابطه زیر به دست می‌آید (دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۹۲):

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{q1}}{k_{q1}}} \quad (۱)$$

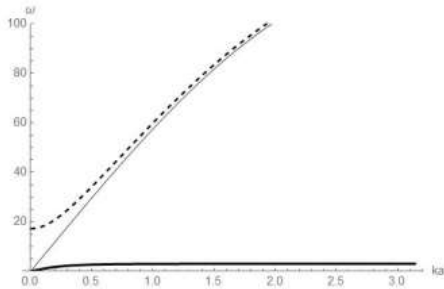
که m_{q1} و k_{q1} به ترتیب جرم و سختی مودال مربوط به مد نخست ارتعاشی هستند. این مقدار باید به روش تحلیلی و با حل معادله مقدار ویژه مودال سازه پیدا شود؛ از این رو مطابق مبحث ششم از مقررات ملی ساختمان می‌توان زمان تناوب اصلی بیشتر ساختمان‌ها را با توجه به مشخصات ساختمان و ارتفاع آن از تراز پایه و به کمک رابطه تجربی زیر محاسبه کرد:

$$T = 0.05H^{\frac{3}{4}} \quad (۲)$$

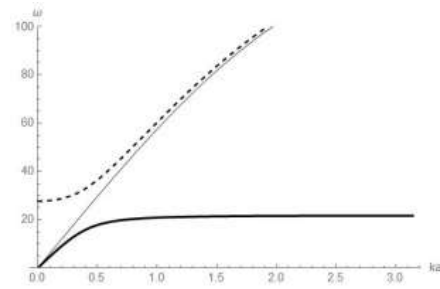
که H ارتفاع ساختمان برحسب متر از تراز پایه و T دوره تناوب اصلی ساختمان برحسب ثانیه است. به طور متوسط برای ساختمان‌های دو تا شش طبقه اگر ارتفاع ساختمان ۱۰ تا ۳۰ متر فرض شود، آنگاه دوره تناوب طبیعی ساختمان در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۶۵ ثانیه، بسامد طبیعی ساختمان (وارون دوره تناوب طبیعی، $f = \frac{1}{T}$) حدود ۱/۵ تا ۳/۵ هرتز و

مقادیر مختلف برای جنس اجزای سازنده آن به دست آمده‌اند.

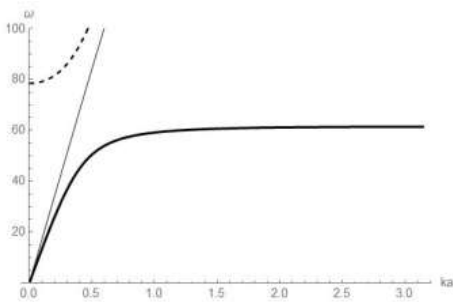
که $\alpha_{KM} = \frac{1}{2} \left(\alpha_K + \frac{\alpha_K}{\alpha_M} \right)$ است. با تنظیم سه متغیر این رابطه، محل نوار ایست را می‌توان تغییر داد. شکل ۲ چند حالت مختلف از فراماده شکل ۱ را نشان می‌دهد که به‌ازای



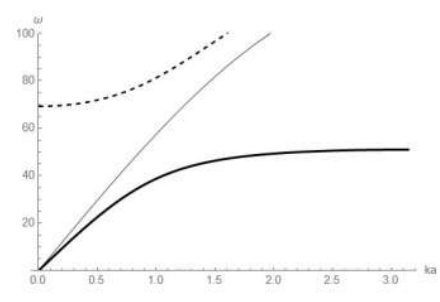
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. نمودارهای پاشیدگی فراماده با ساختار هندسی مطابق شکل ۱ به‌ازای: (الف) $\alpha_K=0/08, \alpha_M=0/6$ و $\omega_M=60 \text{ rad/s}$ (ب) $\alpha_K=0/08, \alpha_M=30$ و $\omega_M=60 \text{ rad/s}$ (ج) $\alpha_K=0/5, \alpha_M=0/6$ و $\omega_M=60 \text{ rad/s}$ (د) $\alpha_K=0/08, \alpha_M=0/6$ و $\omega_M=170 \text{ rad/s}$.

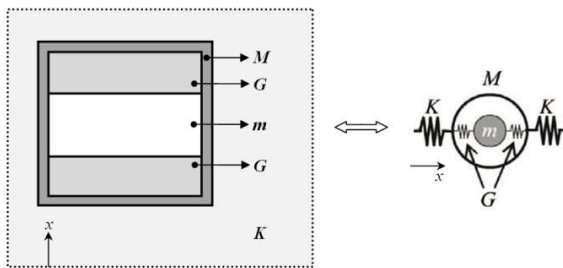
باشد. در مدل یک‌بعدی، G سختی ماده پرکننده تشدیدگر و در نقش همان فنرهای داخلی مدل یک‌بعدی است. این پارامتر پس از بهینه‌یابی مقدار نسبت سختی‌ها (α_K) پیدا می‌شود. جرم‌های m و M نیز به ترتیب جرم‌های هسته داخلی و اتاقک خارجی هستند که با بهینه‌سازی در مدل یک‌بعدی مقدار یابی می‌شوند. K سختی برشی خاک پیرامونی است که تشدیدگرهای فراماده در آن جای می‌گیرند. در الگوی یک‌بعدی، خاک پیرامونی با فنرهای بیرونی مدل شده است. مقدار K مدل یک‌بعدی بر اساس رفتار برشی برابر است با:

$$K = \frac{\mu A}{\kappa L} \quad (5)$$

که μ مدول برشی، A سطح مقطع تشدیدگر، L طول ستون

ملاحظه می‌شود که با افزایش نسبت جرم‌های درونی به بیرونی، نوار ایست به بسامدهای کمتر منتقل می‌شود (شکل ۲-ب) و افزایش نسبت سختی‌های درونی به بیرونی سبب جابه‌جایی نوار ایست به بسامدهای بیشتر می‌شود (شکل ۲-ج). همچنین، محل نوار ایست را می‌توان با سامان‌دهی تشدیدگر بیرونی مناسب تنظیم کرد (شکل ۲-د).

از آنجا که بازه بسامدی هدف بسیار کوچک و در محدوده زیرصوتی و لرزه‌ای است، طراحی بلور فونونی برای کنترل و میراسازی امواج در این محدوده مقرون به صرفه و اجرایی نیست؛ از این رو هدف پژوهش، طراحی فراماده‌ای یک‌بعدی با هندسه تشدیدگر مطابق شکل ۱ است که توانایی کنترل امواج لرزه‌ای را در این بازه داشته



شکل ۳. ساختار هندسی فراماده پیشنهادی معادل با مدل یک‌بعدی فراماده.

۳ یافته پژوهش

در این بخش، با پیروی از روش طراحی ارائه شده در بخش گذشته، ساختار تشدیدگر پایه فراماده و طول کارگذاری آن جهت میراسازی امواج برشی در ساختمان‌های دو تا شش طبقه تعیین می‌شود؛ برای نمونه فراماده مناسب برای خاک رس متوسط با مدول برشی 10 MPa طراحی می‌شود. مشخصات اجرایی فراماده استوانه‌ای عبارت است از: قطر بیرونی برابر 50 سانتیمتر؛ ضخامت اتاقک بیرونی برابر $7/5$ سانتیمتر؛ طول استوانه تشدیدگر برابر $0/5$ متر؛ چگالی اتاقک بیرونی برابر 1600 kg/m^3 . با این ابعاد و جنس انتخابی، جرم بیرونی M برابر 80 kg خواهد شد که به لحاظ اجرایی مناسب است. همچنین فاصله میان تشدیدگرها برابر $0/5$ متر فرض می‌شود. بر این اساس، سختی فنر معادل خاک برابر $43/6 \text{ MN/m}$ و بسامد تشدیدگر بیرونی برابر 738 rad/s خواهد شد.

اکنون با بهینه‌سازی رابطه، مقادیر نسبت‌های جرمی و سختی به ترتیب برابر 3 و $0/0005$ به دست می‌آیند. به این ترتیب، پارامترهای مدل یک‌بعدی تشدیدگر شامل M ، m و G به ترتیب برابر 80 kg ، 240 kg و 11 kN/m خواهد بود. ملاحظه می‌شود که جرم داخلی سه برابر جرم بیرونی و سختی ماده پرکننده میانی بسیار کوچک است. نمایش نمودار پاشیدگی به‌ازای مقادیر بهینه‌یابی شده در شکل ۴ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نوار ایست با بازه بسامدی هدف همپوشان است.

خاک بین تشدیدگرها، و K ضریب شکل است که برای مقطع مستطیلی، $1/2$ و برای مقطع دایره‌ای، $0/9$ است. جدول ۱ مقادیر معمول مدول‌های برشی کشسانی را برای چند گونه خاک گزارش کرده است. با انتخاب نوع خاک، می‌توان فراماده مناسب را جهت میراسازی امواج در بازه بسامدی هدف طراحی کرد.

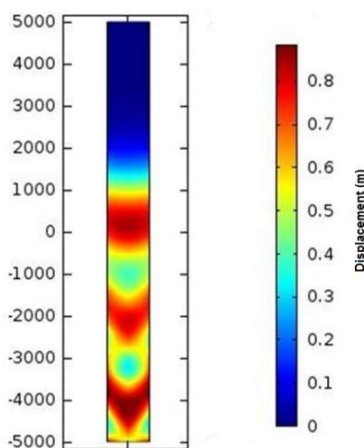
جدول ۱ مشخصه‌های کشسانی برشی چند گونه خاک.

گونه خاک	مدول برشی (MPa)
خاک رس خیلی نرم	$0/17-1/7$
خاک رس نرم	$1/7-7$
خاک رس متوسط	$7-17$
خاک رس سفت یا سیلتی	$17/7-35/4$
خاک رس شنی	$8/8-70$
شیل رسی	$35/4-70$
شن و ماسه سفت	$3/5-8/8$
شن متراکم	$8/8-35/4$
شن متراکم و گراول	$39/4-78/8$
شن و ماسه سیلتی	$8/8-70$

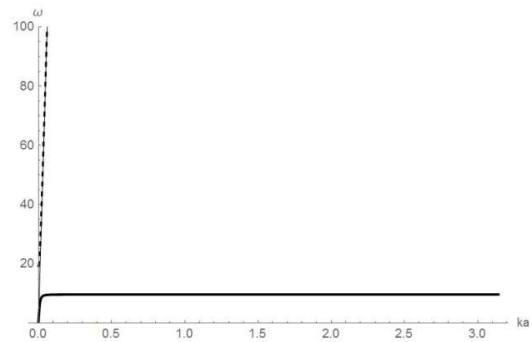
۳-۲ طراحی سه‌بعدی فراماده

شکل ۳ اجرای تشدیدگر پایه را بر اساس مدل یک‌بعدی آن نشان می‌دهد که شامل سه بخش اتاقک بیرونی، هسته درونی و پرکننده میانی است. پس از بهینه‌یابی بر مبنای مدل یک‌بعدی و یافتن مقادیر نسبت‌های جرمی و سختی، هندسه و جنس سه بخش سازنده تشدیدگر پایه برای حالت سه‌بعدی (بر مبنای مقادیر پارامترهای مدل یک‌بعدی) مقدار یابی می‌شود. همچنین طول اجرای آرایه تشدیدگرهای پایه با بهره‌گیری از شبیه‌سازی به روش اجزای محدود تعیین می‌شود. در شبیه‌سازی عددی انتشار موج در فراماده، از مدل ساده‌شده ماده پیوسته با چگالی منفی استفاده می‌شود. این چگالی از تقسیم جرم مؤثر فراماده (که عددی منفی است) بر حجم آن به دست می‌آید.

میانی ($\mu_G = \frac{2Gk(L-L_i-2t)}{\pi r_i^2}$) برابر با 0.27 KPa خواهد بود. این مقدار فوق‌العاده کم و در حد صفر است؛ بنابراین، می‌توان ماده پرکننده را سیال (مایع) مناسبی در نظر گرفت. برای تعیین طول تقریبی فراماده و ارزیابی فراماده پیشنهادی، از شبیه‌سازی به روش اجزای محدود بهره گرفته شد. برای این منظور، انتشار موج سینوسی برشی با بسامد زاویه‌ای 15 rad/s در ستونی دوبعدی از خاک به طول 10 کیلومتر و پهنا 100 متر برای دو حالت خاک معمولی و فراماده بررسی می‌شود. چگالی، مدول کشسانی و ضریب پواسون ستون خاک به ترتیب برابر 1900 kg/m^3 ، 10 MPa و 0.25 انگاشته می‌شوند. فراماده نیز با استفاده از مدل ساده‌شده ماده پیوسته، با چگالی منفی برابر 860 kg/m^3 شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی در نرم‌افزار COMSOL 5.0 انجام گرفته است. شکل‌های ۵-الف و ۵-ب چگونگی انتشار این موج هارمونیک را در ستون خاک معمولی و فراماده به ترتیب در لحظه 10 s و 1 s نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که فراماده به خوبی موج را میرا ساخته است و اجازه انتشار را به آن نمی‌دهد. بر اساس شکل ۵-ب، طول اجرای آرایه تشدیدگرهای فراماده بین 100 تا 250 متر کافی خواهد بود.



(الف)



شکل ۴. نمودار پاشیدگی مدل یک‌بعدی فراماده پیشنهادی برای خاک رس متوسط.

پس از بهینه‌یابی بر مبنای مدل یک‌بعدی، هندسه و جنس سه ساختار سازنده تشدیدگر (اتاقک بیرونی، هسته درونی و پرکننده میانی) برای حالت سه‌بعدی (بر مبنای مقادیر پارامترهای مدل یک‌بعدی) مقدار یابی می‌شود. کوشش شده است تا در این مرحله، ابعاد تشدیدگر پایه از 0.5 متر فراتر نرود. بر این اساس، طراحی صورت گرفته برای اجزای سه‌گانه تشدیدگر به قرار زیر است:

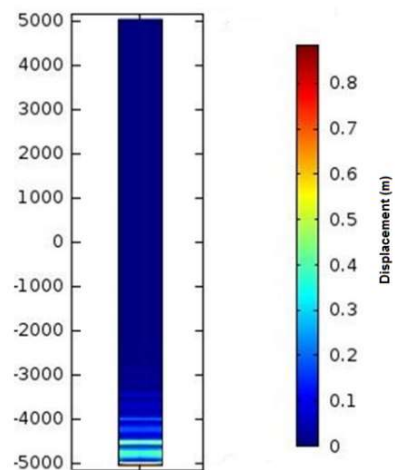
۱) اتاقک بیرونی، استوانه‌ای به طول $L = 0.5 \text{ m}$ ، ضخامت $t = 0.075 \text{ m}$ ، شعاع بیرونی $r_o = 0.25 \text{ m}$ ، شعاع داخلی $r_i = 0.175 \text{ m}$ و چگالی $\rho_M = 1600 \text{ kg/m}^3$ تعیین می‌شود. بر این اساس، اتاقک بیرونی از جنس بتن سبک با مقاومت زیاد و چگالی $\rho_M = 1600 \text{ kg/m}^3$ ، مقاومت فشاری 35 MPa ، مدول کشسانی $E_M = 25 \text{ GPa}$ و $\nu = 0.25$ در نظر گرفته می‌شود (حسین علی بیگی و همکاران، ۱۳۸۶).
 ۲) هسته درونی، استوانه‌ای به طول $L_i = 0.22 \text{ m}$ ، شعاع $r_i = 0.175 \text{ m}$ و چگالی $(\rho_m = \frac{m}{\pi r_i^2 L_i})$ 11340 kg/m^3 فرض می‌شود. بر این اساس، هسته درونی از جنس سرب با چگالی حدودی $\rho_m = 11400 \text{ kg/m}^3$ ، مدول کشسانی $E_M = 16 \text{ MPa}$ و $\nu = 0.44$ در نظر گرفته می‌شود.

۳) با توجه به مقدار سختی برشی G ، مدول برشی پرکننده

ساکنان آنها دارد، از دیگر دلایل لزوم کنترل امواج لرزه‌ای است. در چنین مواردی، به‌نظر می‌رسد کنترل امواج لرزه‌ای پیش از رسیدن موج به سازه‌های سطحی یا زیرسطحی، در مقایسه با مقاوم‌سازی سازه‌ها، گزینه منطقی‌تری جهت اجرا باشد. برای کنترل امواج لرزه‌ای پیش از رسیدن به سازه، دو شیوه کلی منحرف‌سازی و میراسازی امواج را می‌توان برگزید که شیوه دوم، کاربردی‌تر است. میراسازی امواج به کمک مواد مصنوعی گسسته انجام می‌پذیرد. این مواد در دو دسته کلی بلورهای فونونی و فرامواد جای می‌گیرند. در میراسازی، نوارهای ایست بسامدی نمودار پاشیدگی را با دستکاری در پارامترهای هندسی و جنس عناصر سازنده تنظیم می‌کنند.

هدف از این پژوهش، ساخت ماده مصنوعی گسسته مناسب جهت میراسازی امواج در محدوده بسامدهای ارتعاشی ساختمان‌های معمولی بود. برای این منظور، فرامواد، مناسب‌تر از بلورهای فونونی تشخیص داده شد. بهینه‌یابی ساختار فراماده با دستکاری در هندسه و جنس تشدیدگرهای سازنده فراماده و آرایش و چینش آنها صورت می‌گیرد. آرایش‌های پیشنهادی در مقالات اغلب از سه نوع شبکه‌ای منظم یکنواخت با فواصل یکسان، شبکه‌ای منظم با فواصل متغیر و آرایش فرکتالی (پیشنهادشده برای کنترل فوتون‌ها) است. در این پژوهش، از ساده‌ترین گونه آرایش (شبکه یکنواخت) استفاده شد و بهینه‌یابی فراماده تنها با دستکاری ساختار تشدیدگر سازنده (و نه آرایش تشدیدگرها) انجام شد. پس از گزینش ساختار هندسی، جنس بهینه برای اجزای تشدیدگر انتخابی (هسته درونی، پرکننده میانی و پوسته بیرونی) تعیین شد. برای این کار روند زیر دنبال شد:

الف) بازه مناسب بسامدی نوار ایست بر مبنای بسامدهای طبیعی ارتعاشی (مربوط به مد اول) ساختمان‌های دو تا شش طبقه محاسبه شد تا در بهینه‌یابی تشدیدگر فراماده به‌کار رود. بهینه‌یابی مشخصه‌های تشدیدگر با این هدف



(ب)

شکل ۵. نمایش انتشار موج در ستون (الف) خاک معمولی (ب) فراماده.

۴ نتیجه‌گیری

کنترل پدیده زلزله با دستکاری در آرایش سازه‌ها، به دلیل سهولت دسترسی، منطقی‌ترین روش برای کاهش آسیب‌های زلزله است، اما این کار در مواردی یا امکان‌پذیر نیست یا بسیار پرهزینه است؛ برای نمونه، بهسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها و بناهای تاریخی بسیار دشوار است. نوع مصالح به‌کاررفته در این بناها و قدمتشان کار مقاوم‌سازی را با دشواری‌های عدیده‌ای روبه‌رو می‌کند. از سوی دیگر، اصولاً دخالت در این نوع سازه‌ها و دستکاری آنها، کاری پرخطر به‌شمار می‌رود که در صورت انجام دادن به‌فرجام نیز، تا حدودی از ارزش و اصالت تاریخی بنا خواهد کاست. برای نمونه‌ای دیگر، می‌توان به بناهای فرسوده در بافت‌های قدیمی شهری اشاره کرد که جدا از هزینه هنگفت مقاوم‌سازی تک‌تک آنها، نمای تاریخی بنا نیز با دخالت‌های مهندسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. افزون بر زلزله، گاهی محافظت موقت ساختمان‌ها در برابر امواج لرزه‌ای ناشی از چشمه‌های مصنوعی همچون انفجار و... نیز مورد نیاز صنعت ساخت‌وساز است. همچنین، کنترل لرزش‌های دائمی مانند ارتعاشات پدیدآمده در سازه‌های پیرامون تونل‌های مترو و...، که تأثیر بسزایی در آسایش

- damping with arrays of inertial resonators: *Extreme Mechanics Letters*, **8**, 30-37.
- Elford, D. P., Chalmers, L., Kusmartsev, F. V., and Swallowe, G. M., 2011, Matryoshka locally resonant sonic crystal: *Journal of the Acoustical Society of America*, **130**(5), 2746-2755.
- Engheta, N., and Ziolkowski, R. W., 2006, *Metamaterials Physics and Engineering Explorations*: John Wiley & Sons Publication, USA.
- Gregersen, E., 2018, HAARP, scientific facility, Alaska, United States; <https://www.britannica.com/topic/HAARP>.
- Kim, S. H., and Das, M. P., 2013, Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials: *Modern Physics Letters B*, **27**(20), 1350140.
- Kittel, C., 1996, *Introduction to Solid State*: John Wiley & Sons Publication, New York.
- Krowne, C. M., and Zhang, Y., 2007, *Physics of negative refraction and negative index materials*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Krödel, S., Thomé, N., and Daraio, C., 2015, Wide band-gap seismic metastructures: *Extreme Mechanics Letters*, **4**, 111-117.
- Maldovan, M., 2013, Sound and heat revolutions in phononics: *Nature*, **503**(7475), 209-217.
- Martinezsala, R., Sancho, J., Sánchez, J. V., Gómez, V., Llinares, J., and Meseguer, F., 1995, Sound-attenuation by sculpture: *Nature*, **378**(6554), 241-241.
- Mei, J., Ma, G., Yang, M., Yang, Z., Wen, W., and Sheng, P., 2012, Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound: *Nature Communications*, **3**, 756.
- Sarychev, A. K., and Shalaev, A. M., 2007, *Electrodynamics of Metamaterials*: World Scientific Publishing, Singapore.
- Stein, S., and Wysession, M., 2003, *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*: Blackwell Publishing, USA.
- Sukhovich, A., Merheb, B., Muralidharan, K., Vasseur, J. O., Pennec, Y., Deymier, P. A., and Page, J. H., 2009, Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals: *Physical Review Letters*, **102**(15), 154301.
- صورت گرفت که نوار ایست نمودار پاشیدگی فراماده، بازه بسامدی مزبور را به‌ازای انواع خاک‌های پیرامونی بیوشاند. (ب) در بهینه‌یابی تشدیدگر، از مدل یک‌بعدی استفاده شد. مدل یک‌بعدی این پژوهش، تشدیدگر دو جرمی تودرتو با فنر داخلی است. این تشدیدگر که با فنرهای بیرونی مدل شده است، در ماده زمینه (خاک) جاگذاری می‌شود.
- (ج) پس از بهینه‌یابی مدل یک‌بعدی، ویژگی‌های ساختار سه‌بعدی بر مبنای مشخصه‌های عددی به‌دست آمده برای مدل یک‌بعدی استخراج شد.
- (د) پس از طراحی تشدیدگر سازنده فراماده، عملکرد آن با مدل‌سازی عددی یک‌بعدی و دوبعدی بررسی و ارزیابی شد. نتایج، نشان‌دهنده کارایی تشدیدگر پیشنهادی در میراسازی دامنه امواج لرزه‌ای در محدوده بسامدی هدف بود.
- ### مراجع
- داتا، تی. کی، ۱۳۹۱، اصول و روش‌های تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، ترجمه رضا خواجه‌وی: انتشارات دانشگاه امام رضا، مشهد.
- دفتر امور مقررات ملی ساختمان (وزارت راه و شهرسازی)، ۱۳۹۲، مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان: نشر توسعه ایران.
- حسین علی بیگی، م.، حسینیان، س. ب.، شفیق، پ.، ۱۳۸۶، ساخت بتن سبک با مقاومت بالا با استفاده از دانه‌های سبک، پودر سنگ و میکرو سیلیس (یادداشت پژوهشی): نشریه دانشکده مهندسی، **۱۹**(۱)، ۱۲۷-۱۳۴.
- Achaoui, Y., Ungureanu, B., Enoch, S., Brûlé, S., and Guenneau, S., 2016, *Seismic waves*

Design of an underground metamaterial for attenuation of seismic shear waves

Reza Khajavi ^{1*} and Zahra Seyyedi

¹ Earthquake Research Center, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

² Earthquake Research Center, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

(Received: 08 February 2022, Accepted: 11 May 2022)

Summary

In the recent decade, some effort is expended in deviating and attenuating seismic waves, following the sophisticated electromagnetic-wave (photon) control by a well-known synthetic-material technology: metamaterial. There are many reports in the literature on successful control of mechanical waves (phonons) in acoustic and thermal frequency ranges by phononic crystals and metamaterials; however, they fail to efficiently control waves over low-frequency ranges, like seismic and earthquake waves. The bottleneck is the very long wavelengths of the earthquake waves which inevitably necessitates large-scale structures for seismic metamaterials. This research intends to dampen destructive shear waves before reaching the target structures by designing metamaterials with small dimensions and easy portability and execution. The rationale of this study is that in earthquakes, a significant part of the damage to the building is caused by the excitation of the first vibrational mode, and if the waves with frequencies near to the frequency of the first vibration of the building are filtered out or damped from the frequency content of the input excitation, the resonance phenomenon may not occur, and damage to the building is expected to be significantly reduced. In this study, with the aim of protecting typical two- to six-story buildings, the frequency range of the first vibrating mode is determined based on the experimental relationships presented in Section 6 of the Iran National Building Code. Then, utilizing the proposed dispersion relation for the one-dimensional metamaterial, the geometry and material of the metamaterial base resonator are designed so that the metamaterial stop-band corresponds to the target frequency range which is supposed to be filtered out. In order to facilitate the implementation, efforts have been made so that the dimensions of the base resonator are not large. The metamaterial designed for placement in medium clay, is a cylinder with a diameter and a length of 0.5 m of lightweight and high-strength concrete in which the interior lead cylinders are located in an intermediate filling fluid. Using the simplified continuous model of the proposed metamaterial, its performance against the shear wave with the frequency located in the target stop-band has been investigated. Based on this study, the proposed metamaterial is able to quickly reduce the amplitude of shear waves of an earthquake. This metamaterial can be used to protect urban buildings built near faults. It might also be used for cases where earthquake-resistant systems cannot be installed in the body of structures or foundations (e.g. historical and sensitive buildings, rural or old urban areas, etc.).

Keywords: Damping, earthquake, metamaterial, stop band, vibrational mode