

بررسی تشدیدکننده‌های متناوب به عنوان موانع موج برای کاهش امواج لرزه‌ی سطحی با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه

شهاب امانت (کارشناس ارشد)

رضا رفیعی دهخوارفانی* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۱/۴، ص. ۵۳-۶۰، پژوهشی)

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تشدیدکننده‌های متناوب به عنوان یک رویکرد برای کاهش امواج لرزه‌ی سطحی است. به این منظور، ابتدا با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه، شبکه‌ی نامحدودی از تشدیدکننده ارزیابی شده است. سپس با استفاده از مفهوم خط صوت، شکاف‌باند مربوط به امواج سطحی تعیین شده‌اند. مفهوم خط صوت برای تشخیص امواج سطحی خالص به کار می‌رود. سپس از آنجایی که فرضیات تئوری بلاخ - فلوکه براساس شبکه‌ی نامحدود است، اما شبکه‌ی موانع لرزه‌ی در واقعیت شبکه‌ی محدود است، راستی‌آزمایی شکاف‌باند مذکور با در نظر گرفتن یک مدل شبکه‌ی محدود در دو حوزه بسامد و زمان ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که تشدیدکننده‌ی طراحی شده در پژوهش حاضر، شکاف‌باند قابل توجهی برای کاهش امواج سطحی دارد. همچنین نتایج حاصل از بررسی شبکه‌ی محدود نشان می‌دهد که با استفاده از تشدیدکننده‌های مذکور، دامنه‌ی امواج سطحی در بازه‌ی متناظر با شکاف‌باند در حوزه‌ی بسامد و زمان به ترتیب ۴۴ و ۷۲ کاهش یافته‌اند.

واژگان کلیدی: موانع لرزه‌ی، تشدیدکننده، شکاف‌باند، تئوری بلاخ - فلوکه، خط صوت.

amanat.shahab@ut.ac.ir
rezarafiee@ut.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه بررسی موانع لرزه‌ی، بخش عمده‌ی مطالعات مهندسی ژئوتکنیک را شامل می‌شود. در ادبیات فنی، پژوهشگران با به کارگیری تئوری‌ها و رویکردهای مختلف به طراحی و بررسی موانع لرزه‌ی پرداخته‌اند. یکی از رویکردهای مذکور، به کارگیری یک شبکه‌ی متناوب از موانع لرزه‌ی است که با توجه به ساختار موانع و آرایش شبکه‌ی اخیر، بخش قابل توجهی از امواج لرزه‌ی در برخورد با شبکه، بازتاب می‌شوند و به سازه‌ی مورد نظر نمی‌رسند. به منظور بررسی شبکه‌ی متناوب اشاره شده، رویکردهای عددی و آزمایشگاهی متنوعی ارائه شده است. یکی از به روزترین روش‌های موجود، تحلیل شبکه با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه^۱ است که در اصل یکی از تئوری‌های موجود در فیزیک حالت جامد و رویکردی برای بررسی یک شبکه‌ی نامحدود از موانع است که در اصطلاح به آن سلول واحد^۲ می‌گویند.

با فرض یک شبکه از سلول‌های واحد در اطراف سازه، تئوری بلاخ - فلوکه این امکان را فراهم می‌کند که با مدل کردن یک سلول واحد و اعمال شرایط مرزی تناوب فلوکه^۳، شبکه به صورت نامحدود تحلیل شود. به این صورت که به ازاء بردار موج‌های مختلف در ناحیه‌ی بریلوئن اول^۴، بسامدهای ویژه به دست می‌آیند و پس از پس پردازش‌های مناسب، وجود ناحیه‌ی که در آن هیچ بسامد ویژه‌ی نباشد، بررسی

امواج لرزه‌ی حاصل از زلزله، سالانه در سراسر جهان خسارت‌های جانی و مالی جبران‌ناپذیری را به جوامع بشری وارد می‌کنند. در نتیجه، مهندسان همواره در تلاش برای ارائه‌ی رویکردهای جدیدی به منظور کاهش امواج لرزه‌ی مخرب بوده‌اند. بسیاری از پژوهشگران با بهبود آیین‌نامه‌های طراحی یا به کارگیری مصالح جدید، برای مقاوم‌سازی سازه‌ها تلاش کرده‌اند. اما یکی دیگر از رویکردهایی که در مهندسی ژئوتکنیک از دیرباز مطالعه شده است، به کارگیری موانع لرزه‌ی در خاک اطراف سازه به منظور کاهش امواج لرزه‌ی منتقل شده به سازه است. شاید بتوان از اولین مطالعات صورت گرفته در این زمینه به مطالعات وودز^۱ (۱۹۶۸)^۱ در بیش از نیم قرن پیش اشاره کرد. در سال‌های بعد، نیز بسیاری از پژوهشگران به بررسی دقیق‌تر موانع لرزه‌ی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی پرداخته‌اند. می و بولت^۲ (۱۹۸۲)^۲ یکی از اولین مدل‌سازی‌های عددی را بر روی ترانسه‌های موجود در خاک به منظور کاهش امواج لرزه‌ی انجام داده‌اند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۴/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۱/۵/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۶/۱۴

DOI:10.24200/J30.2022.60363.3099

می‌شود که در اصطلاح به بازه‌ی بسامدی مذکور، شکاف‌باند^۷ می‌گویند. شکاف‌باند در حقیقت بازه‌ی از بسامد است که در صورت داشتن یک شبکه‌ی نامحدود از موانع موردنظر، تمامی موج‌های دارای بسامدی در بازه‌ی شکاف‌باند در اثر برخورد با شبکه بازتاب می‌شوند و از شبکه عبور نمی‌کنند.^[۳]

یکی از اولین پژوهش‌های انجام شده برای به کارگیری تئوری بلاخ - فلوک در مهندسی عمران، توسط هوانگ و شی^۸ (۲۰۱۳)،^[۴] صورت گرفته است. ایشان به بررسی زمین‌هایی شامل یک شبکه‌ی دوبعدی از سلول‌های واحد از شعاع‌های بتنی پرداخته‌اند. همچنین علاوه بر در نظر گرفتن آرایش‌های مربعی و مثلثی برای شبکه، به بررسی تأثیر جنس خاک و اندازه‌ی شعاع شعاع‌ها بر روی شکاف‌باند پرداخته و دریافته‌اند که ارتعاش‌های با بسامدی در بازه‌ی شکاف‌باند به کمک موانع اخیر به طور قابل توجهی کاهش می‌یابند. یکی دیگر از مطالعات جامع در حوزه‌ی اشاره شده، توسط دریمانیس^۹ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۵] صورت گرفته است. ایشان سلول واحدی شامل یک هسته‌ی متراکم، یک پوسته‌ی نازک متشکل از یک ماده‌ی سبک، و تاندون‌های الاستومر را در نظر گرفتند و با استفاده از تئوری بلاخ - فلوک و تحلیل ارتعاش کلاسیک، آن را ارزیابی کردند. طرح پیشنهادی ایشان می‌توانست شکاف‌باندی در بازه‌ی بسامدی خیلی کم، ۰/۵ تا ۵ هرتز ایجاد کند.

با توجه به قرار گرفتن بیشتر سازه‌ها در سطح و یا در نزدیکی سطح زمین، امواج سطحی دارای تأثیر مخرب بیشتری هستند. به این منظور در بخش عمده‌ی از مطالعات موجود در ادبیات فنی، پژوهشگران به دنبال یافتن شکاف‌باند امواج سطحی هستند. به این منظور پو^{۱۰} و شی^{۱۱} (۲۰۱۷)،^[۶] به بررسی انتشار امواج سطحی در ساختارهای یک‌بندی و دوبعدی پرداخته‌اند. ایشان با استفاده از روش اجزاء محدود و معرفی یک پارامتر توزیع انرژی، روش جدیدی برای شناسایی حالت‌های موج سطحی پیشنهاد دادند. سپس اثربخشی روش جدید ارائه شده را با مقایسه با برخی از مطالعات مرتبط تأیید کردند و از روش مذکور برای مطالعه‌ی یک سیستم متناوب خاک - شمع بر اساس مدل عددی سه‌بندی استفاده کرده‌اند. سپس ایشان (۲۰۱۸)،^[۳] در مطالعه‌ی دیگری به بررسی رفتار شمع برای کاهش امواج سطحی ناشی حرکت قطرها در یک زمین لایه‌ی پرداخته و علاوه بر جداسازی امواج سطحی، امواج رابلی را هم از امواج سطحی جدا کرده‌اند؛ زیرا امواج مذکور بیشترین آسیب را به سازه‌های عمرانی وارد می‌کنند. آن‌ها دریافته‌اند که با استفاده از شمع‌هایی از جنس خاکستر بادی^{۱۱} می‌توان به یک شکاف‌باند برای امواج سطحی از نوع رابلی در بازه‌ی بسامدی ۳۹/۷ تا ۴۶ هرتز دست پیدا کرد که راستی‌آزمایی شکاف‌باند اخیر هم در حوزه‌ی بسامد و هم در حوزه‌ی زمان، به کمک شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود مدل شبکه‌ی محدود تأیید شده است.

نکته‌ی قابل توجه در طراحی موانع لرزه‌ی، محدوده‌ی بسامد شکاف‌باند است. شکاف‌باند باید بر بازه‌ی از بسامد منطبق باشد که در صورت اعمال امواج لرزه‌ی در بازه‌ی بسامدی ذکر شده، سازه دچار آسیب شود. بدون شک امروزه امواج لرزه‌ی ناشی از زلزله، یکی مخرب‌ترین امواج لرزه‌ی هستند که کاهش آثار آن هدف بسیاری از مطالعات رشته‌ی مهندسی عمران در سراسر جهان است. بیشتر آسیب‌های ناشی از امواج لرزه‌ی ناشی از زلزله در بسامدهای پایین، یعنی در محدوده‌ی زیر ۱۰ هرتز، رخ می‌دهد؛ در نتیجه اهمیت وجود شکاف‌باند در بسامدهای پایین، بسیار زیاد است. به‌طور کلی، علاوه بر ساختار سلول واحد و نوع خاک، ابعاد سلول واحد یکی دیگر از عوامل مؤثر در کاهش بسامد شکاف‌باند است؛ به این صورت که معمولاً با افزایش ابعاد یک سلول واحد، بازه‌ی بسامدی شکاف‌باند کاهش می‌یابد.

به این منظور، عده‌ی از پژوهشگران به بررسی ابعاد سلول واحدی به ابعادی تا ۱۰ متر پرداخته‌اند، که می‌توانند به شکاف‌باند در بسامدهای پایین، دست پیدا کنند.^[۷]

یکی از دیگر روش‌های مؤثر برای دستیابی به شکاف‌باند در بسامدهای پایین، استفاده از تشدیدکننده‌هاست^{۱۲}. به‌طور کلی، تشدیدکننده‌ها با ایجاد تشدید در یک بازه‌ی خاص بسامدی موجب ایجاد شکاف‌باند می‌شوند. تشدیدکننده‌ها به دو صورت محصور و غیرمحصور در خاک در نظر گرفته می‌شوند. از نمونه مطالعات انجام شده در زمینه‌ی تشدیدکننده‌های محصور در خاک می‌توان به مطالعه‌ی پالمو^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶)،^[۹] اشاره کرد. آن‌ها به طراحی یک فراماده‌ی لرزه‌ی پرداخته‌اند که باعث تبدیل امواج لرزه‌ی سطحی رابلی به امواج حجمی برشی می‌شود. هر ساختار تشدیدکننده‌ی در نظر گرفته شده توسط ایشان، از یک جرم استوانه‌ی تشکیل شده است که توسط فنرهای الاستومر در داخل یک بدنه‌ی بتنی معلق است و می‌توان آن را با بسامد تشدید موردنظر تنظیم کرد. همچنین آن‌ها عملکرد هر فراماده را با یک مدل تجربی مقیاس‌یافته بررسی کرده و دریافته‌اند که حرکت سطح زمین را می‌توان تا ۵۰٪ با استفاده از تشدیدکننده‌های اخیر در بسامد زیر ۱۰ هرتز کاهش داد. بازه‌ی بسامدی اشاره‌شده، برای حفاظت از ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی بسیار مناسب است.

محمد^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۰] به منظور کاهش امواج لرزه‌ی سطحی، از تشدیدکننده‌های فولادی غیرمحصور در خاک استفاده کردند و دو نوع ساختار فولادی برای تشدیدکننده‌ها در نظر گرفتند و آن‌ها را در خاک یک‌لایه و چندلایه ارزیابی کردند. با توجه به تشدید صورت گرفته، آن‌ها توانستند به شکاف‌باند‌هایی با بسامدهای پایین برای امواج سطحی دست پیدا کنند. همچنین ایشان نتایج به دست آمده از تحلیل شبکه‌ی محدود را که با استفاده از تئوری بلاخ - فلوک حاصل شده بود، با به کارگیری شبکه‌ی محدود در حوزه‌ی بسامد و زمان ارزیابی کردند و نتایج، نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای تشدیدکننده‌های مذکور در کاهش امواج لرزه‌ی در بسامدهای پایین بوده است.

لیو^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۱] از هر دو مفهوم عمق انرژی^{۱۶} و خط صوت^{۱۷} به منظور به‌دست آوردن شکاف‌باند امواج سطحی استفاده کردند و نشان دادند که تشدیدکننده‌های در نظر گرفته شده با ارتفاع ۱۲ متر، توانایی تولید چندین شکاف‌باند را در بازه‌ی بسامدهای پایین دارند. همچنین دریافته‌اند که ترکیب هر دو مفهوم عمق انرژی و خط صوت، می‌تواند بازه‌ی شکاف‌باند را با دقت بالاتری محاسبه کرد. دو روش اصلی در پس‌پردازش امواج سطحی، روش‌های مبتنی بر توزیع انرژی^{۱۸-۱۲} و روش خط‌صوت^[۱۷،۱۶] هستند. در روش عمق مؤثر انرژی از این مفهوم استفاده می‌شود که بیشتر انرژی امواج سطحی در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند؛ پس می‌تواند با توجه به انرژی کرنشی، مودهای سطحی را از هم جدا کرد. مطالعات در روش خط صوت نشان داده است که کمترین مود حجمی در حقیقت در مرز بین امواج سطحی خالص با امواج سطحی غیرخالص و حجمی است؛ در نتیجه می‌توان از آن برای پیدا کردن شکاف‌باند امواج سطحی استفاده کرد.

در پژوهش حاضر سعی شده است با توجه به تئوری بلاخ - فلوک و استفاده از خط صوت، یک ساختار از تشدیدکننده‌ها به منظور کاهش امواج سطحی ارائه شود. شایان ذکر است که برخلاف برخی مطالعات پیشین، که در آن‌ها عمدتاً از تشدیدکننده‌های فولادی استفاده شده است، در نوشتار حاضر جنس تشدیدکننده، بتنی بوده است که نسبت به مطالعات موجود، علاوه بر هندسه‌ی ساده‌تر، ابعاد و ارتفاع کوچک‌تری دارد، در نتیجه از لحاظ عملی، کار بردی‌تر و اقتصادی‌تر است.

۲. روش پژوهش

۱.۲. تعریف مسئله

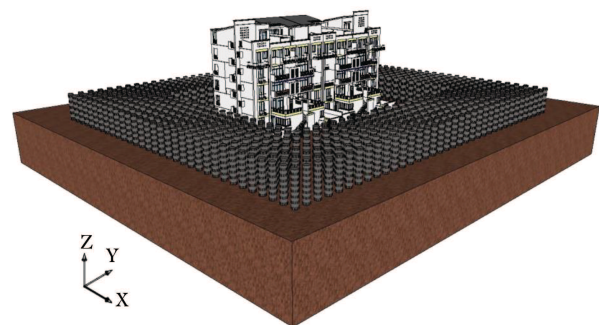
هدف اصلی در پژوهش حاضر، کاهش امواج لرزه‌یی سطحی با استفاده از یک شبکه از تشدیدکننده‌ها مانند شکل ۱ است. اما شبیه‌سازی یک شبکه‌ی کامل بدون استفاده از مفهوم سلول واحد و مرزهای متناوب به علت گسترده بودن هندسه با استفاده از بیشتر نرم‌افزارهای موجود عددی، بسیار پرهزینه و تقریباً غیرممکن است. این در حالی است که با استفاده تئوری بلاخ - فلوکه می‌توان رفتار یک تشدیدکننده را به راحتی در یک شبکه‌ی نامحدود و با هزینه‌ی محاسباتی بسیار کم بررسی کرد. بدین منظور در پژوهش حاضر، از تئوری بلاخ - فلوکه برای بررسی رفتار یک سلول واحد از یک تشدیدکننده استفاده و شکاف‌باند متناسب با امواج سطحی برای تشدیدکننده محاسبه شده است. همچنین از آنجا که در واقع، پیاده‌سازی یک شبکه‌ی نامحدود امکان‌پذیر نیست، راستی‌آزمایی شکاف‌باند موردنظر در یک شبکه‌ی محدود ساده شده در دو حوزه‌ی بسامد^{۱۸} و زمان^{۱۹} بررسی شده است. در پژوهش حاضر، برای بررسی شبکه‌های محدود و نامحدود از نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول^{۲۰} استفاده شده است که به دلیل قابلیت بسیار بالای آن در شبیه‌سازی مرزهای متناوب براساس تئوری بلاخ - فلوکه بوده است. در نتیجه به جای شبیه‌سازی یک شبکه‌ی کامل می‌توان از مفهوم سلول واحد استفاده کرد و هزینه‌های محاسباتی را به طرز محسوسی کاهش داد. از آنجا که برای حل مسئله هم در شبیه‌سازی سلول واحد (شبکه‌ی نامحدود) و هم در شبکه‌ی محدود از روش عددی اجزاء محدود استفاده شده است، لذا هندسه‌ی مسائل با استفاده از مش‌بندی گسسته شده‌اند.

۲.۲. تئوری بلاخ - فلوکه در ساختارهای متناوب

در مطالعه‌ی حاضر، رفتار مانع لرزه‌یی و خاک به صورت کشسان خطی، همگن و با صرف‌نظر کردن از میرایی، در نظر گرفته شده است؛ زیرا علاوه بر ساده کردن شبیه‌سازی، از کاهش دامنه‌ی امواج به دلیل میرایی مصالح صرف‌نظر شده است، تا کارایی مانع لرزه‌یی به صورت واضح‌تر مشخص شود. همچنین به منظور سادگی شبیه‌سازی، از رفتار ویسکوکشسان خاک و نیز رفتار غیرخطی بین خاک و مانع لرزه‌یی صرف‌نظر شده است. معادله‌ی انتشار موج در محیط همگن، ایزوتروپ و بدون میرایی مطابق رابطه‌ی ۱ است^[۶]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla c \nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

که در آن، ∇ عملگر دیفرانسیلی، t پارامتر زمان، c تانسور کشسانی، ρ چگالی و



شکل ۱. یک مدل کامل از شبکه‌ی تشدیدکننده در اطراف سازه.

\mathbf{u} بردار جابه‌جایی هستند. در یک ساختار متناوب میدان جابه‌جایی به صورت رابطه‌ی ۲ است^[۱۰]:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \mathbf{u}_{\mathbf{K}}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

که در آن، $\mathbf{u}_{\mathbf{K}}(\mathbf{r})$ میدان مدولاسیون جابه‌جایی^{۲۱}، ω بسامد زاویه‌یی و $\mathbf{K} = (k_x, k_y)$ بردار موج است که k_x و k_y به ترتیب عدد موج^{۲۲} در راستای فضای بریلوئن متقابل^{۲۳} هستند. تمام واحدهای سازنده‌ی یک ساختار متناوب نامحدود که در اصطلاح به آن سلول واحد می‌گویند، دارای میدان‌های متناوبی هستند. در نتیجه میدان مدولاسیون جابه‌جایی، یک میدان متناوب در سلول واحد است. در نتیجه، اگر T بردار ثابت شبکه‌ی متناوب باشد، رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت^[۱۸]:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{K}}(\mathbf{r} + \mathbf{T}) = \mathbf{u}_{\mathbf{K}}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

در اصل با استفاده از تئوری مذکور، شبکه‌ی اصلی به شبکه‌ی بریلوئن متقابل تبدیل می‌شود که بردارهای پایه‌ی شبکه‌ی بریلوئن متقابل، فضای فوری‌ی بردارهای پایه‌ی شبکه‌ی اصلی هستند. در نتیجه، بردارهای پایه‌ی شبکه‌ی بریلوئن متقابل را می‌توان به فرم رابطه‌ی ۴ تعریف کرد:

$$\mathbf{b}_x = 2\pi \frac{\mathbf{a}_y \times \mathbf{a}_z}{\mathbf{a}_x \cdot (\mathbf{a}_y \times \mathbf{a}_z)}; \mathbf{b}_y = 2\pi \frac{\mathbf{a}_z \times \mathbf{a}_x}{\mathbf{a}_y \cdot (\mathbf{a}_z \times \mathbf{a}_x)}; \quad (4)$$

که در آن، $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$ بردارهای پایه‌ی فضای شبکه‌ی اصلی هستند. در پژوهش حاضر، شبکه به صورت دو بُعدی و دارای ساختار متناوب در نظر گرفته شده است، بنابراین بردارهای پایه‌ی فضای شبکه‌ی اصلی به صورت رابطه‌ی ۵ هستند:

$$\mathbf{a}_x = (a_x, 0, 0); \mathbf{a}_y = (0, a_y, 0); \mathbf{a}_z = (0, 0, 1) \quad (5)$$

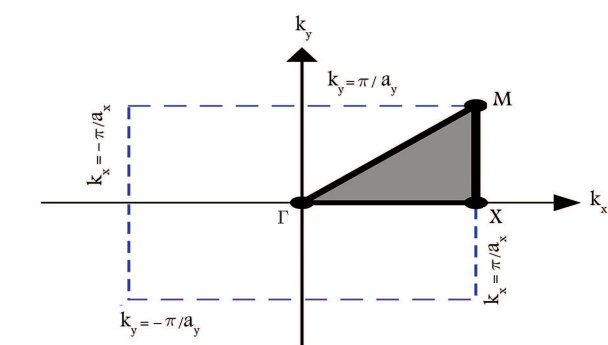
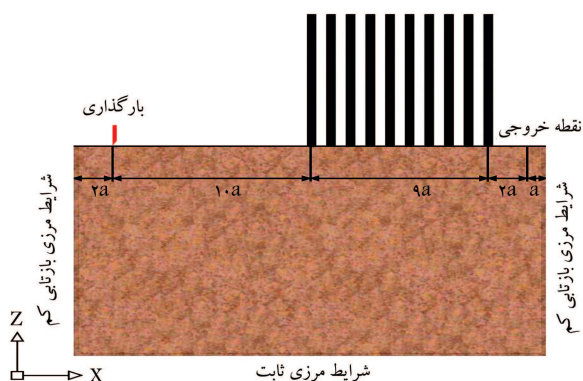
که در آن \mathbf{a}_x و \mathbf{a}_y به ترتیب ابعاد سلول واحد در راستای محورهای مختصات و عناصر پایه‌ی سازنده‌ی بردار ثابت شبکه‌ی متناوب هستند. در نتیجه رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\mathbf{b}_x = (2\pi/a_x, 0, 0); \mathbf{b}_y = (0, 2\pi/a_y, 0) \quad (6)$$

از طرفی با جایگذاری رابطه‌ی ۳ در رابطه‌ی ۲، شرایط مرزی متناوب برای سلول واحد مطابق رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r} + \mathbf{T}, t) = e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}, t)} \mathbf{u}(\mathbf{r}, T) \quad (7)$$

به عبارتی دیگر، در واقع مطابق با شرایط مرزی به دست آمده، موج‌های ورودی و خروجی از یک سلول واحد، دارای اختلاف فاز $\mathbf{K} \cdot \mathbf{T}$ هستند. سلول واحد بعد از اعمال شرایط مرزی در رابطه‌ی ۷، در حقیقت نماینده‌ی یک شبکه‌ی نامحدود است؛ به عبارتی دیگر، با اعمال شرایط مرزی اخیر به یک سلول واحد، معادله‌ی تبدیل به یک مسئله‌ی مقدار ویژه برای شبکه نامحدود می‌شود.^[۱۹] هر نقطه از شبکه‌ی بریلوئن متقابل، در حقیقت متناظر با یک مود از شبکه‌ی نامحدود اصلی است. از طرفی، با توجه به متناوب بودن شبکه فقط کافی است که سلول واحد در کوچک‌ترین واحد تکرارشونده که به اصطلاح به آن ناحیه‌ی بریلوئن اول می‌گویند، بررسی شود. از طرفی در یک سلول واحد متقارن به دلیل تقارن، فقط می‌توان شبکه‌ی نامحدود را با $\frac{1}{8}$ ناحیه‌ی بریلوئن اول بررسی کرد؛ که در اصطلاح به ناحیه‌ی اخیر، ناحیه‌ی بریلوئن ناکاستنی اول^{۲۴} می‌گویند. ناحیه‌ی بریلوئن اول و ناحیه‌ی بریلوئن ناکاستنی اول در شکل ۲ مشاهده می‌شوند. با جایگذاری رابطه‌ی شرایط



شکل ۲. ناحیه‌ی خط‌چین، نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی بریلوئن اول و ناحیه‌ی هاشورخورده، نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی بریلوئن ناکاستنی اول است.

شکل ۳. شبکه‌ی محدود از تشدیدکننده برای بررسی در حوزه‌های بسامد و زمان.

که در آن، $|K|$ بیانگر اندازه‌ی بردار موج و c_s سرعت موج برشی در خاک است که برابر با $c_s = \sqrt{G/\rho}$ است. همچنین G مدول برشی و ρ چگالی خاک هستند.

مرزی متناوب در رابطه‌ی انتشار موج، مسئله‌ی مقدار ویژه به صورت رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$(\Omega(K) - \omega^2 M) \cdot U = 0 \quad (8)$$

که در آن $\Omega(K)$ ، ماتریس سختی به صورت تابعی از بردار موج، M ماتریس جرم، ω بسامد زاویه‌ی U بردار جابه‌جایی هستند. رابطه‌ی ۸، در حقیقت یک مسئله‌ی مقدار ویژه است که یک رابطه‌ی ضمنی بین بردار مکان و بسامدی برقرار می‌کند که از آن می‌توان نمودار رابطه‌ی پراکندگی 25 را به دست آورد. سپس اگر بازه‌ی بسامد در نمودار رابطه‌ی پراکندگی دارای هیچ مودی نباشد، در اصطلاح به آن شکاف‌باند می‌گویند. شکاف‌باند در حقیقت بازه‌ی بسامد را نشان می‌دهد که امواجی با بسامدی در بازه‌ی بسامدی شکاف‌باند نمی‌توانند از شبکه‌ی نامحدود سلول‌های واحد موردنظر عبور کنند و در واقع توسط شبکه‌ی مذکور، بازتاب می‌شوند.

۴.۲. بررسی شبکه‌ی محدود در حوزه‌ی بسامد و زمان

در حقیقت، شکاف‌باند بازه‌ی بسامد را نشان می‌دهد که در صورت وجود یک شبکه‌ی نامحدود از موانع موردنظر، هیچ مودی با بسامد مذکور از شبکه عبور نمی‌کند و در واقع بازتاب می‌شود. اما در واقعیت، ساخت یک شبکه‌ی نامحدود میسر نیست. بنابراین همانند برخی مطالعات پیشین در ادبیات فنی^{[۱۱]، [۱۲]} مانع لرزه‌ی اعتبار شکاف‌باند آن باید در یک شبکه‌ی محدود ارزیابی شود. بدین منظور در پژوهش حاضر، شبکه‌ی سه‌بعدی از یک ردیف 10° تایی از تشدیدکننده‌ها با ابعاد و شرایط مرزی مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است که بتوان شبکه‌ی محدود را در حوزه‌های بسامد و زمان ارزیابی کرد. شایان ذکر است که شرایط مرزی در جهت عمود بر صفحه به صورت متناوب در نظر گرفته شده است، تا شرایط مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در حقیقت فرض شده است در جهت عمود بر صفحه، به تعداد کافی، سلول واحد قرار گرفته است. همچنین در سمت راست و چپ مدل از شرایط مرزی جاذب استفاده شده است، تا امواج ارتعاشی از مدل خارج شوند؛ به عبارتی، یک محیط نیمه‌بی‌نهایت از خاک مدل‌سازی شده است. در انتهای مدل هم به دلیل فرض وجود سنگ بستر، از شرایط ثابت استفاده شده است.

به منظور بررسی راستی آزمایی شکاف‌باند به دست آمده در حوزه‌ی بسامد، از تحلیل دامنه‌ی بسامدی برای شبکه‌ی محدود استفاده شده است. به این صورت که یک مدل اجزاء محدود از شبکه‌ی شامل تعدادی سلول واحد موردنظر توسط یک بارگذاری هارمونیک در نقطه‌ی ورودی بار مطابق شکل ۳ با بسامد متناسب با شکاف‌باند تحریک شده است. سپس با مقایسه‌ی جابه‌جایی نقطه‌ی خروجی در سمت دیگر تشدیدکننده، برای مدل با مانع لرزه‌ی و مدل بدون مانع لرزه‌ی، میزان کارایی مانع لرزه‌ی ذکر شده تعیین شده است. بدین منظور در پژوهش حاضر، ابتدا ضریب کاهش دامنه 27 که در رابطه‌ی 10° توسط وود (۱۹۶۸)^[۱] ارائه شده است، استفاده شده است:

$$AR = \frac{U_{with\ barriers}}{U_{without\ barriers}} \quad (10)$$

که در آن، $U_{with\ barriers}$ ، $U_{without\ barriers}$ به ترتیب مقدار جابه‌جایی کل در مدل با مانع و بدون مانع هستند. سپس میزان طیف کاهش دامنه 28 مطابق رابطه‌ی 11 ، 12 محاسبه شده است:

$$ARS = 20 \log_{10} AR \quad (11)$$

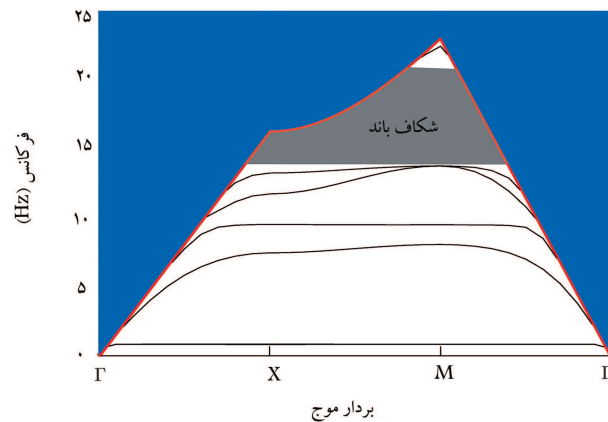
۳.۲. مفاهیم خط صوت و مخروط صوت 26

مطالعات صورت گرفته شده در ادبیات فنی در فیزیک حالت جامد نشان داده‌اند که می‌توان مرزی بین امواج سطحی خالص و امواج سطحی ناخالص در نمودار رابطه‌ی پراکندگی رسم کرد که در اصطلاح به مرز ذکر شده، خط صوت می‌گویند. خط صوت در حقیقت کمترین مودهای حجمی در نمودار رابطه‌ی پراکندگی هستند. همچنین مخروط صوت، ناحیه‌ی بالایی خط صوت است که مودهایی که در درون آن قرار می‌گیرند، احتمالاً حالت‌های تشعشعی بسیار پرتلفات هستند^[۱۶]. در نتیجه، فقط حالت‌های زیر خط صوت یا به عبارتی خارج از مخروط صوت، به عنوان مود سطحی خاص تلقی می‌شوند. در حقیقت مودهای سطحی خالص هستند که می‌توانند در سطح زمین در طول قابل ملاحظه‌ی ارتعاش پیدا کنند؛ اما مودهای سطحی ناخالص به سرعت در مسیر ارتعاش، انرژی خود را به لایه‌های پایینی منتقل می‌کنند و شدت آن‌ها در طول مسیر ارتعاش به سرعت کاهش می‌یابد. پس متداول است که در مطالعات این حوزه، از موج‌های سطحی ناخالص صرف‌نظر کرد و فقط مودهای بالای خط صوت، یعنی مودهای سطحی خاص تحلیل و بررسی شوند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که خط صوت را می‌توان با استفاده از مشخصات مصالح بستر در تشدیدکننده‌ها تعیین کرد. لیو و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۱] خط صوت را با استفاده از رابطه‌ی ۹ رسم کردند و نشان دادند که مفهوم خط صوت به خوبی در کاربردهای مهندسی عمران کاربرد دارد:

$$\omega = |K| \cdot c_s \quad (9)$$

جدول ۲. مشخصات مصالح تشدیدکننده و خاک بررسی شده.

عنوان	مدول کشسانی	چگالی	ضریب پواسون
بتن	۲۵ گیگاپاسکال	۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰/۲
خاک	۲۰ گیگاپاسکال	۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰/۳



شکل ۵. نمودار رابطه‌ی پراکندگی برای تشدیدکننده‌ی بررسی شده (ناحیه‌های آبی و طوسی رنگ به ترتیب متناظر با مخروط صوت و شکاف باند هستند).

به شعاع ۵/۰ متر و ارتفاع ۶ متر از جنس بتن بوده و ثابت شبکه مربوط به سلول واحد برابر ۲ متر فرض شده است. نکته‌ی قابل توجه در پژوهش حاضر این است که تشدیدکننده‌ی مذکور نسبت به تشدیدکننده‌های در نظر گرفته شده در بسیاری از مطالعات موجود، ارتفاع بسیار کمتری دارد و همچنین در بسیاری از مطالعات موجود از مصالح فولادی یا خاصی استفاده شده است؛ اما در پژوهش حاضر، تشدیدکننده‌ی بررسی شده از جنس بتن بوده است که موجب کاربردی‌تر شدن پژوهش حاضر شده است. در پژوهش حاضر، خاک به صورت یک لایه به عمق ۳۰ متر و مشابه مشخصات ارائه شده در پژوهش محمد و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۱] در نظر گرفته شده است. مشخصات بتن و خاک در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

به منظور مدل‌سازی سلول واحد در نرم‌افزار کامسول از شرایط مرزی متناوب از نوع بلاخ - فلوکو با بردار موج متناسب در ناحیه‌ی بریلونن ناکاستی اول در چهار طرف مدل استفاده شده است تا شرایط نظیر شبکه‌ی نامحدود برقرار باشد. همچنین شرایط مرزی سطح به صورت آزاد و شرایط مرزی انتهایی مدل ثابت در نظر گرفته شده است، تا مدل‌سازی با واقعیت مطابقت داشته باشد.

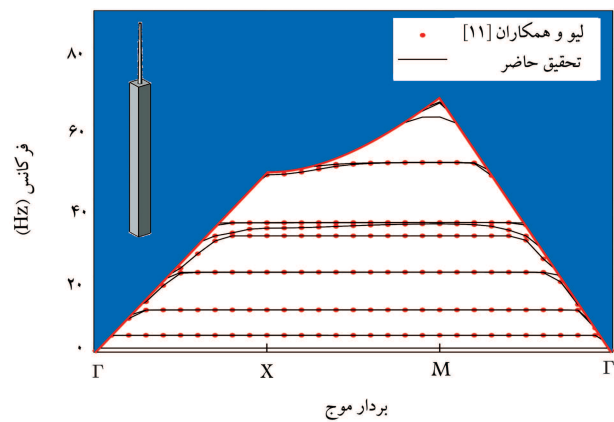
۳. نتایج و بحث

نمودار رابطه‌ی پراکندگی برای تشدیدکننده‌ی بررسی شده مطابق شکل ۵ است که نشان‌دهنده‌ی یک شکاف باند در بازه‌ی ۱۴ تا ۲۱ هرتز در زیر خط صوت است. در نتیجه، مطابق با توضیحات بخش‌های قبلی، مودهای خارج از خط صوت مذکور، مود سطحی خالص نیستند و در صورت وجود یک شکاف باند در زیر خط صوت انتظار می‌رود که ناحیه‌ی مذکور همانند یک شکاف باند امواج سطحی عمل کند.

نتایج به دست آمده در حوزه‌ی بسامد در شکل ۶ مشاهده می‌شوند که مطابق آن، در ناحیه‌ی متناظر با شکاف باند، مقدار طیف کاهش دامنه، منفی

جدول ۱. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده در تحقیق لیو و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۱].

عنوان	مدول کشسانی	چگالی	ضریب پواسون
تشدیدکننده	۱/۳۷ گیگاپاسکال	۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰/۳
خاک	۱۳۷/۰ گیگاپاسکال	۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۰/۳۵



شکل ۴. اعتبار سنجی پیاده‌سازی سلول واحد در نرم‌افزار کامسول با نتایج ارائه شده توسط لیو و همکاران^[۱۱]. ناحیه آبی رنگ مخروط صوت را نشان می‌دهد.

اگر مانع لرزه‌ی کارایی مناسبی داشته باشد، انتظار می‌رود ضریب کاهش دامنه، کوچک‌تر از ۱ باشد و به طبع آن، طیف کاهش دامنه نیز باید منفی باشد. هر چه طیف کاهش دامنه منفی‌تر باشد، کارایی سلول واحد بیشتر است. به منظور بررسی در حوزه‌ی زمان از یک بارگذاری قائم با فرم $F(t) = \sin(2\pi f_B t)$ در نقطه‌ی ورودی استفاده شده است که در آن f_B بسامد بارگذاری است که در ناحیه‌ی شکاف باند قرار دارد. سپس برای مدل با مانع و بدون مانع، جابه‌جایی نقطه‌ی خروجی در جهت قائم به دست آمده و پس از نرمال کردن به بیشینه‌ی جابه‌جایی حالت بدون مانع در یک نمودار رسم شده است که نمودار مذکور به خوبی نشان‌دهنده‌ی کارایی مانع لرزه‌ی در حوزه‌ی زمان است.

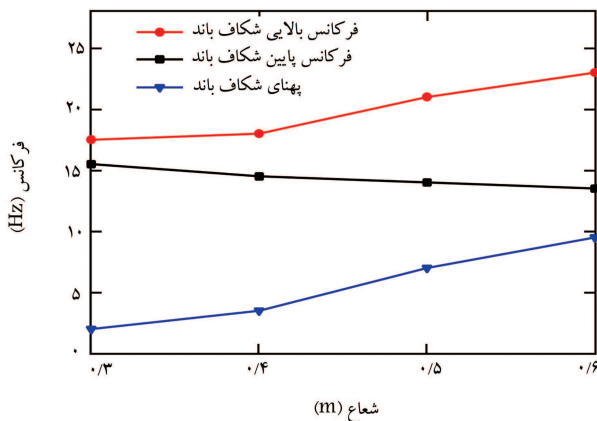
۵.۲. اعتبار سنجی

به منظور بررسی راستی آزمایشی پیاده‌سازی یک سلول واحد در نرم‌افزار کامسول، بخشی از نتایج به دست آمده توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهش حاضر مجدداً بررسی شده است تا با تطبیق نتایج، اعتبار سایر مدل‌سازی‌های در پژوهش حاضر تأیید شوند. ایشان از تشدیدکننده‌هایی به فرم درخت به ارتفاع ۱۲ متر با شعاع پایینی ۰/۳ متر و شعاع بالایی ۰/۱۵ متر در یک سلول واحد با ثابت شبکه‌ی ۲ متر متشکل از ۳۰ متر خاک تک‌لایه استفاده کردند. مشخصات تشدیدکننده و خاک در نظر گرفته شده توسط آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

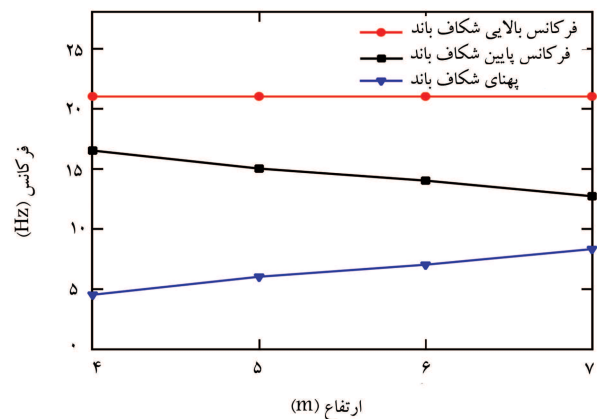
نتایج به دست آمده همراه با مخروط صوت در شکل ۴ مشاهده می‌شوند که مطابق آن با نتایج ارائه شده توسط لیو و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۱] تطابق دقیقی دارد و در نتیجه، راستی آزمایشی مدل‌سازی‌های اجزاء محدود را نشان می‌دهد. شایان ذکر است برای اطمینان از درستی نتایج، اندازه‌ی مش و نمو مربوط به عدد موج با استفاده از تحلیل حساسیت انتخاب شده است.

۶.۲. تشدیدکننده‌ی بررسی شده

در پژوهش حاضر، مانع لرزه‌ی به صورت یک تشدیدکننده با شکل استوانه‌ی و



شکل ۸. تغییرات پهنا، بسامدهای بالایی و پایینی شکاف‌باند به ازاء مقادیر مختلف شعاع تشدیدکننده.



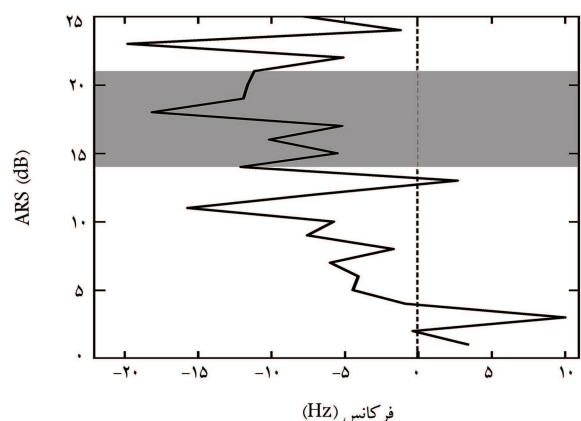
شکل ۹. تغییرات پهنا، بسامدهای بالایی و پایینی شکاف‌باند به ازاء مقادیر مختلف طول تشدیدکننده.

دو پارامتر اخیر در پهناى شکاف‌باند (BGW)، بسامد بالایی شکاف‌باند (UBG) و بسامد پایین شکاف‌باند (LBG) صورت گرفته است. نتایج حاصل به ازاء تغییرات بازه و عرض شکاف‌باند به ازاء شعاع و طول تشدیدکننده به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش شعاع تشدیدکننده به ترتیب باعث افزایش و کاهش بسامد بزرگ‌تر و کوچک‌تر در شکاف‌باند و در نتیجه افزایش پهناى شکاف‌باند شده است. این در حالی است که بسامد بزرگ‌تر در شکاف‌باند با افزایش طول تشدیدکننده، ثابت مانده است، اما بسامد کوچک‌تر کاهش و مجدداً پهناى شکاف‌باند افزایش یافته است.

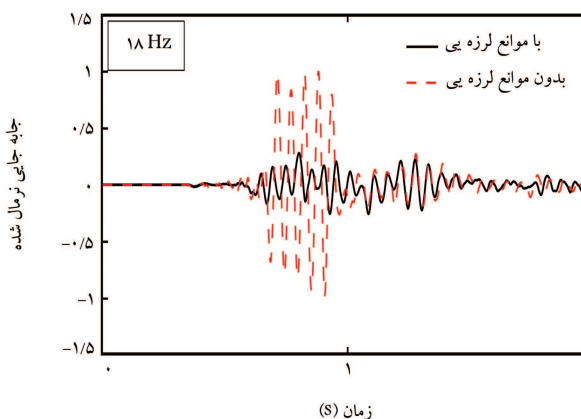
۴. نتیجه‌گیری

استفاده از تشدیدکننده‌ها، یکی از روش‌های متداول در کاهش دامنه‌ی امواج لرزه‌ی سطحی است. در حقیقت، تشدید به‌وجودآمده بین تشدیدکننده و امواج سطحی باعث می‌شود که در یک بازه‌ی بسامدی، امواج از شبکه عبور نکنند و در عمل بازتاب شوند. در پژوهش حاضر، نیز با استفاده از تئوری بلاخ - فلوکه، یک تشدیدکننده‌ی بتنی بررسی شده است که از دو جهت کاربردی است:

۱. مصالح تشدیدکننده‌ی در نظر گرفته‌شده، بتن است که برخلاف مطالعات موجود از فولاد یا مصالح خاص و گران‌قیمت استفاده نشده است.



شکل ۶. طیف پاسخ دامنه در حوزه‌ی بسامد برای تشدیدکننده‌ی بررسی شده (ناحیه‌ی طوسی‌رنگ، ناحیه‌ی متناظر با شکاف‌باند است).



شکل ۷. نتیجه‌ی بررسی شبکه‌ی محدود تشدیدکننده‌ی بررسی شده در حوزه‌ی زمان.

است که نشانگر کارایی تشدیدکننده‌ی مذکور است. نکته‌ی قابل توجه، میزان منفی بودن طیف کاهش دامنه است، به طوری که در تمام ناحیه‌ی شکاف‌باند، مقدار آن تقریباً از $-5/1$ کمتر است که بیانگر کاهش قابل ملاحظه‌ی دامنه‌ی امواج لرزه‌ی سطحی است. مطابق رابطه‌ی ۱۱، اگر مقدار طیف کاهش دامنه کمتر از $-5/1$ باشد، نشان‌دهنده‌ی بیش از ۴۴٪ کاهش در دامنه‌ی امواج لرزه‌ی سطحی است که مقدار بسیار قابل توجهی است. همچنین شایان ذکر است که به دلیل محدودیت‌های مدل‌سازی، شبکه‌ی محدود فقط در یک راستای افقی ناحیه‌ی بریلونن ناکاستی اول بررسی شده است. از آنجایی که شکاف‌باندی که فقط متناسب با راستای اخیر است، متفاوت از بازه‌ی شکاف‌باند متناظر با ناحیه‌ی کامل بریلونن ناکاستی اول است؛ لذا، در بسامدهای دیگر حوزه‌ی بسامد نیز کاهش مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، مدل‌سازی حوزه‌ی بسامد فقط به دلیل نشان دادن راستی‌آزمایی کارایی شکاف‌باند انجام شده است. نتایج بررسی شبکه در حوزه‌ی بسامد به ازاء $f_B = 18 \text{ Hz}$ در شکل ۷ مشاهده می‌شود. مطابق با نتایج اخیر، تشدیدکننده‌ی بررسی شده در حوزه‌ی زمان نیز توانایی بسیار خوبی در کاهش امواج لرزه‌ی در محدوده‌ی شکاف‌باند دارد. مطابق با نتایج اخیر، میزان بیشینه‌ی دامنه‌ی ارتعاش ناحیه‌ی خروجی بعد از به کارگیری تشدیدکننده‌ها، ۷۲٪ کاهش یافته است.

دو پارامتر کلیدی تأثیرگذار در بازه و عرض شکاف‌باند در تشدیدکننده‌ها، طول و شعاع تشدیدکننده هستند. به این منظور در پژوهش حاضر، یک بررسی بر روی تأثیر

تشدیدکننده، بسامد بالایی شکاف باند ثابت مانده است.

نتایج به دست آمده، توانایی تشدیدکننده‌ی مذکور را در ایجاد شکاف باندی در بازه‌ی بسامدی ۱۴ تا ۲۱ برای شبکه‌ی نامحدود موانع مطابق با تئوری بلاخ - فلوکه نشان می‌دهد. همچنین راستی‌آزمایی شکاف باند اخیر با مدل‌سازی یک شبکه‌ی محدود در دو حوزه‌ی بسامد و زمان بررسی شده است که نتایج حاکی از توانایی تشدیدکننده‌ی موردنظر در کاهش امواج لرزه‌ی سطحی در بازه‌ی متناسب با شکاف باند بوده است.

۲. ارتفاع تشدیدکننده، ۶ متر بوده است. این در حالی است که در مطالعات موجود، ارتفاع تشدیدکننده معمولاً بیش از ۱۰ متر فرض شده است.

۳. با افزایش شعاع و طول تشدیدکننده، بازه‌ی شکاف باند افزایش و بسامد پایینی شکاف باند کاهش یافته‌اند. همچنین با افزایش شعاع تشدیدکننده، بسامد بالایی شکاف باند نیز افزایش یافته است. این در حالی است که به ازاء افزایش طول

پانویس‌ها

1. Woods
2. May & Bolt
3. Bloch-Floquet Theory
4. unit cell
5. floquet periodicity
6. first brillouin zone
7. Bandgap
8. Huang & Shi
9. Dertimanis
10. Pu
11. Flyash
12. resonators
13. Palermo
14. Muhammad
15. Liu
16. depth of energy
17. sound line
18. frequency domain
19. time domain
20. Comsol
21. displacement modulation function
22. Wavenumber
23. Brillouin reciprocal space
24. first irreducible brillouin zone
25. dispersion relation
26. sound cone
27. amplitude reduction factor (AR)
28. amplitude reduction spectra (ARS)

منابع (References)

1. Woods, R.D. "Screening of surface wave in soils", *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, **94**(4), pp. 951-979 (1968).
2. May, T.W. and Bolt, B.A. "The effectiveness of trenches in reducing seismic motion", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **10**(2), pp. 195-210 (1982).
3. Pu, X. and Shi, Z. "Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils", *Construction and Building Materials*, **180**, pp. 177-187 (2018).
4. Huang, J. and Shi, Z. "Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for plane waves", *Journal of Sound and Vibration*, **332**(19), pp. 4423-4439 (2013).
5. Dertimanis, V.K., Antoniadis, I.A. and Chatzi, E.N. "Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers", *Journal of Engineering Mechanics*, **142**(9), pp. 04016060 (2016).
6. Pu, X. and Shi, Z. "A novel method for identifying surface waves in periodic structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **98**, pp. 67-71 (2017).
7. Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia F. and et al. "Large scale mechanical metamaterials as seismic shields", *New Journal of Physics*, **18**(8), pp. 083041 (2016).
8. Du, Q., Zeng, Y., Huang, G. and et al. "Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves", *AIP Advances*, **7**(7), pp. 075015 (2017).
9. Palermo, A., Krodel, S., Marzani, A. and et al. "Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves", *Scientific Reports*, **6**(1), pp. 1-10 (2016).
10. Muhammad, Lim, C. and Reddy, J. "Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium", *Engineering Structures*, **188**, pp. 440-451 (2019).
11. Liu, Y.-f., Huang, J.-K., Li, Y.G. and et al. "Trees as large-scale natural metamaterials for low-frequency vibration reduction", *Construction and Building Materials*, **199**, pp. 737-745 (2019).
12. Graczykowski, B., Alzina, F., Gomis-Bresco, J. and et al. "Finite element analysis of true and pseudo surface acoustic waves in one-dimensional phononic crystals", *Journal of Applied Physics*, **119**(2), pp. 025308 (2016).
13. Liu, Z., Dong, H.-W. and Yu, G.-L. "Topology optimization of periodic barriers for surface waves", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **63**(1), pp. 463-478 (2021).
14. Muzar, E. and Stotz, J.A. "Surface acoustic wave modes in two-dimensional shallow void inclusion phononic crystals on GaAs", *Journal of Applied Physics*, **126**(2), pp. 025104 (2019).
15. Westafer, R.S., Mohammadi, S., Adibi, A. and et al. "Computing surface acoustic wave dispersion and band gaps", in *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference* (2009).

16. Benchabane, S., Khelif, A., Rauch, J.-Y. and et al “Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal”, *Physical Review E*, **73**(6), pp. 065601 (2006).
17. Khelif, A., Achaoui, Y., Benchabane, S. and et al. “Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface”, *Physical Review B*, **81**(21), pp. 214303 (2010).
18. Kittel, C. “Introduction to solid state physics”, *American Journal of Physics*, **35**(6), pp. 547-548 (1967).
19. Cheng, Z. and Shi, Z. “Composite periodic foundation and its application for seismic isolation”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **47**(4), pp. 925-944 (2018).