



## کاهش انتشار امواج سطحی با استفاده از موانع موج متناوب مدفون متشکل از فوم و خاک

کوروش غلامی، رضا رفیعی دهخوارقانی\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۳  
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

### کلمات کلیدی:

مانع موج  
امواج سطحی  
شبکه متناوب  
تئوری بلاخ-فلوکه  
روش اجزا محدود

**خلاصه:** استفاده از موانع موج یکی از روش‌های موثر برای کاهش اثر امواج لرزه ای است. این موانع دارای هندسه‌های متفاوت بوده و در آرایش‌های متناوب قرار می‌گیرند. با توجه به پیچیدگی رفتار موانع موج و گستردگی آنها، تحقیقات گسترده‌ای در سال‌های اخیر برای یافتن موانع موج موثر صورت گرفته است. در این مطالعه یک مانع موج جدید برای کاهش انتشار امواج سطحی پیشنهاد می‌شود بطوریکه بر خلاف روند معمول طراحی از خاک دست نخورده در مرکز مانع و یک لایه فوم به‌عنوان مصالح نرم در دو طرف آن استفاده می‌شود. در ابتدا با استفاده از مفاهیم فیزیکی حالت جامد و تئوری‌های مربوط به ساختارهای متناوب مانند تئوری بلاخ-فلوکه و با استفاده از نرم افزار اجزا محدود COMSOL، مانع موج در یک شبکه متناوب نامحدود بررسی شده و سپس با تغییر بردار موج در ناحیه اول بریلوئن و به دست آوردن فرکانس‌های ویژه، نمودار پراکندگی رسم می‌شود. با رسم نمودار پراکندگی، شکاف باند متناظر با این سلول واحد به دست می‌آید. از آنجا که در واقعیت امکان ساخت شبکه نامحدود از موانع موج وجود ندارد، یک شبکه محدود از موانع موج مدلسازی شده و نتایج آن با حالت ایده آل شبکه بینهایت مقایسه می‌شود. رفتار شبکه محدود هم در حوزه فرکانس و هم در حوزه زمان بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مانع موج متشکل از خاک و فوم با ارتفاع چهار متر، توانایی بسیار خوبی در کاهش امواج در شبکه‌های نامحدود و محدود دارند و شکاف باند به دست آمده بین ۱۲/۷۵ Hz تا ۱۷/۶۱ Hz هر تراز است.

### ۱- مقدمه

پیدا کردن روش‌های مؤثر برای کاهش آثار نامطلوب امواج لرزه‌ای، همواره یکی از مهم‌ترین موضوع‌های مورد بحث مهندسين عمران در سال‌های اخیر بوده است. این امر زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که سازه‌های تحت تأثیر از دسته سازه‌های پر اهمیت مانند ساختمان‌های درمانی یا واحدهای تولید انرژی باشند. امواج لرزه‌ای بسته به نوع منبع ایجاد امواج می‌توانند انواع مختلفی مانند امواج حجمی<sup>۱</sup>، امواج سطحی<sup>۲</sup>، یا امواج رایلی<sup>۳</sup> باشند. امواج تولید شده توسط ماشین آلات سنگین، عبور و مرور وسایل نقلیه و حرکت قطارها غالباً از نوع امواج رایلی هستند و بنابراین کاهش اثرات این نوع از امواج از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

از میان روش‌های مختلف کاهش آثار نامطلوب امواج لرزه‌ای، استفاده از موانع موج یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌های شناخته شده است.

- 1 Bulk waves
- 2 Surface waves
- 3 Rayleigh wave

این موانع شامل موانع روسطحی و زیر سطحی هستند و می‌توانند توخالی<sup>۴</sup> و پر شده<sup>۵</sup> با مصالح مناسب باشند. وود<sup>۶</sup> از اولین محققینی است که ایده‌ی استفاده از موانع موج را برای کاهش انتشار امواج سطحی بررسی کرد. او با انجام چندین آزمایش برجا، عملکرد ترانشه‌های توخالی به‌عنوان موانع موج را مورد بررسی قرار داد و یک دستورالعمل برای تعیین ابعاد و نحوه اجرای این نوع موانع ارائه کرد [۱]. شلیبی<sup>۷</sup> و همکاران با انجام تعدادی آزمایش، تأثیر ترانشه‌های توخالی و انواع ترانشه‌های پر شده را بررسی کردند و تأثیر سختی موانع بر میزان کاهش انتشار امواج را مورد مطالعه قرار دادند [۲]. می و بولت<sup>۸</sup> با استفاده از مدلسازی اجزای محدود<sup>۹</sup> تأثیرگذاری ترانشه‌های توخالی را برای کاهش انتشار امواج سطحی بررسی کردند [۳]. آدام<sup>۱۰</sup> و استرف<sup>۱۱</sup> با استفاده از

- 4 open
- 5 In filled
- 6 Wood
- 7 Celebi
- 8 Bolt
- 9 Finite element method
- 10 Adam
- 11 Estorff

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rezarafiee@ut.ac.ir



امواج سطحی پرداختند [۳۳]. پو و همکاران ایده‌ی استفاده از ترانسه‌های پر شده از نوعی ژئوفوم را برای کاهش امواج سطحی مورد بررسی قرار دادند [۳۴]. با توجه به تحقیقات ذکر شده، اگر چه استفاده از ترانسه‌های توخالی می‌تواند نتیجه بهتری ایجاد کند، اما به‌دلیل مشکلات پایداری مربوط به ترانسه‌های توخالی، استفاده از ترانسه‌های پر شده مطلوب‌تر است.

در اکثر مطالعات ذکر شده، خاک دست نخورده به‌عنوان یک محیط سخت پیرامون یک مانع موج را فرا گرفته است. در این تحقیقات با استفاده از تفاوت خصوصیات خاک و مصالح استفاده شده به‌عنوان مانع موج، سعی در ایجاد شکاف باند شده است. در ادامه محققین ایده‌ی استفاده از هسته‌ی سنگین<sup>۱۳</sup> و پوشش نرم<sup>۱۴</sup> را به‌منظور ایجاد یک تشدید کننده محلی<sup>۱۵</sup> ارائه نموده و عملکرد سلول واحد<sup>۱۶</sup> متناظر را بررسی نموده‌اند [۳۵]. آن‌ها مشاهده نمودند که استفاده از این توزیع مصالح می‌تواند منجر به ایجاد شکاف باندهایی با پهنای مناسب شود. در این تحقیق در سلول واحد مورد بررسی، خاک در مرکز سلول واحد به‌عنوان یک هسته سنگین باقی می‌ماند و با استفاده از مصالح نرم‌تر سعی در ایجاد یک تشدید کننده محلی می‌گردد. با توجه به اینکه در این روش، خاک دست نخورده به‌عنوان مصالح مرکزی سلول واحد استفاده شده و تنها خاک اطراف آن با یک مصالح نرم‌تر جایگزین می‌شود، این سلول می‌تواند تبدیل به گزینه‌ای مناسب به‌منظور طراحی یک مانع موج بر اساس مفاهیم تناوبی شود. در واقع، نوآوری تحقیق حاضر در این است که برخلاف مقالات قبلی به جای استفاده از ماده سخت در مرکز مانع از خود خاک استفاده می‌شود در حالی که اطراف آن توسط فوم که نرم‌تر از خاک احاطه شده است.

## ۲- تئوری و پیشینه

### ۲-۱- معادله انتشار موج در محیط الاستیک

در تحقیق حاضر، مصالح خاک و مانع لرزه‌ای به صورت همگن و الاستیک در نظر گرفته شده اند و اتصال بین آنها به صورت کامل<sup>۱۷</sup> فرض شده است. معادله انتشار امواج در یک محیط الاستیک خطی همگن را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۲۸]:

$$\nabla \cdot (C(r) : \nabla u(r)) = \rho(r) \frac{(\partial^2 u(r))}{(\partial t^2)} \quad (1)$$

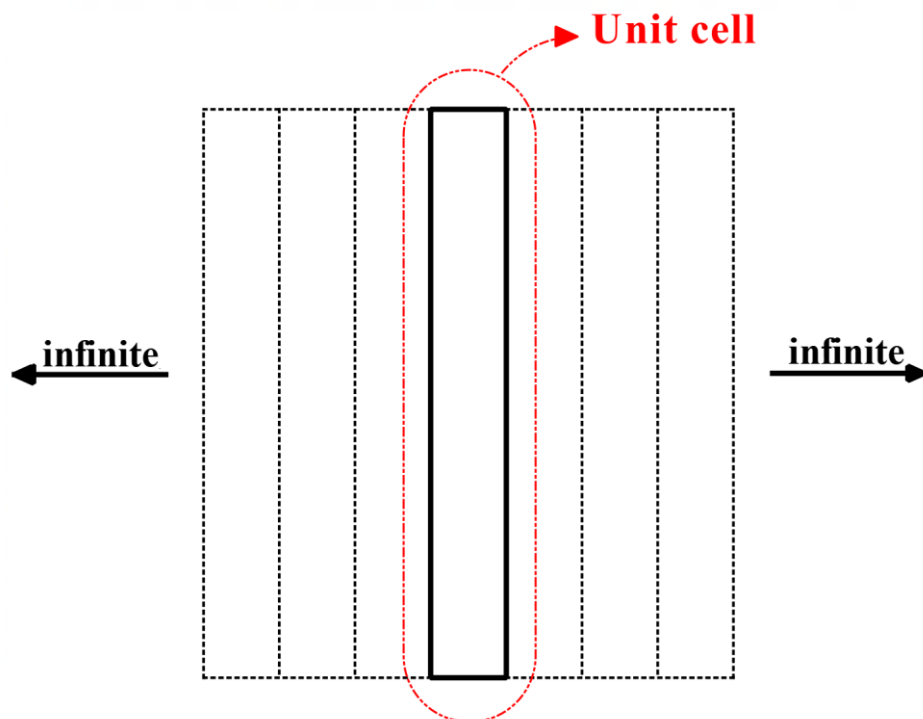
یک مدلسازی دو بعدی، میزان کارایی ترانسه‌های پر شده و توخالی را برای جلوگیری از انتشار امواج تولید شده در اثر عبور قطار را بررسی کردند [۴]. در ادامه چندین مطالعه بر روی ایده‌ی استفاده از شمع‌های مدفون در خاک به‌عنوان مانع انتشار امواج لرزه‌ای انجام شده است [۵-۸]. همچنین، چندین مطالعه دیگر بر روی انواع مانع موج و بررسی عملکرد و یافتن بهترین آنها انجام شده است [۹-۱۶].

در سال‌های اخیر ایده‌ی استفاده از تئوری‌های فیزیک حالت جامد<sup>۱</sup> برای حل مسائل مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این تئوری‌ها، تئوری بلاخ-فلوکه<sup>۲</sup> است که به‌منظور بررسی مانع انتشار موج یا ترانسه‌ها با آرایش متناوب استفاده می‌شود. در این تئوری، ساختار متناوب یک خاصیت منحصر به فرد ایجاد می‌کند و امواج با فرکانسی در محدوده‌ای مشخص، امکان انتشار در ساختار متناوب را نخواهند داشت. این محدوده‌ی فرکانسی خاص شکاف باند<sup>۳</sup> یا ناحیه کاهش<sup>۴</sup> نامیده می‌شود.

یکی از اولین مطالعات صورت گرفته به‌منظور کاهش انتشار امواج با استفاده از این تئوری‌های توسط هانگ<sup>۵</sup> و شی<sup>۶</sup> انجام شده است [۱۷]. آنها با استفاده مدلسازی عددی، شمع‌های مدفون در خاک را با در نظر گرفتن طول بی‌نهایت و آرایش تکرار شونده مورد بررسی قرار دادند. در ادامه، چندین تحقیق دیگر نیز برای بررسی بیشتر ایده استفاده از فیزیک حالت جامد به منظور طراحی مانع انتشار موج انجام شده است [۱۷-۳۱]. پو<sup>۷</sup> و شی<sup>۸</sup> به معرفی روشی جدید برای استفاده از این مانع انتشار موج متناوب به‌منظور کاهش انتشار امواج سطحی پرداختند و روشی برای جداسازی امواج حجمی و سطحی با استفاده از مفهوم توزیع انرژی<sup>۹</sup> ارائه کردند [۳۲]. امانت و همکاران به بررسی مانع انتشار موج برای کاهش امواج سطحی با استفاده از مفهوم خط صوت<sup>۱۰</sup> پرداختند [۲۶]. محمد<sup>۱۱</sup> و ردی<sup>۱۱</sup> با استفاده از شبیه سازی اجزا محدود مقاطع فولادی روی سطح خاک (به‌عنوان یک تشدید کننده<sup>۱۲</sup>) سعی در کاهش امواج سطحی کردند [۲۸]. همچنین برخی از محققین به بررسی استفاده از درختان کاشته شده به‌صورت متناوب (به‌عنوان یک تشدید کننده طبیعی) با استفاده از تئوری‌های ساختارهای متناوب به‌منظور کاهش انتشار

- 1 Solid state physics
- 2 Bloch-Floquet Theory
- 3 Bandgap
- 4 Attenuation zone
- 5 Huang
- 6 Shi
- 7 Pu
- 8 Energy distribution
- 9 Sound line
- 10 Muhammad
- 11 Reddy
- 12 Resonator

- 13 Heavy core
- 14 Soft Coating
- 15 Locally resonant
- 16 Unit cell
- 17 Tied



شکل ۱. شکل شماتیک شبکه بی نهایت و سلول واحد برای یک شبکه متناوب در یک بعد

Fig. 1. Schematic figure of the infinite lattice and unit cell for a periodic one-dimensional lattice

این تئوری می‌توان انتشار موج در این ساختارهای متناوب را بررسی کرد. این تئوری در اصل به حل معادلات دیفرانسیل انتشار موج در ساختارهای متناوب در فیزیک حالت جامد کمک می‌کند. شبکه بی نهایت و سلول واحد به صورت شماتیک در یک شبکه تکرار شونده در یک بعد در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

لازم به ذکر است که بردار موج برداری است که ویژگی‌های موج منتشر شده در خاک را توصیف می‌کند. بردار موج به عوامل مختلفی مانند مشخصات مکانیکی خاک، فرکانس و طول موج و شرایط مرزی مسئله وابسته است. مفهوم فیزیکی تغییر بردار موج در حین انتشار در خاک را می‌توان به تغییر انرژی و تکانه موج ارتباط داد. به عنوان مثال، با افزایش بردار موج انرژی و تکانه موج نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته توسط بریلوئن و تئوری‌های فیزیک حالت جامد، از جمله تئوری بلاخ-فلوکه، معادله (۱) برای یک ساختار متناوب به صورت زیر بیان می‌شود [۳۸]:

$$u(r, t) = e^{i(k \cdot r - \omega t)} u_k(r) \quad (2)$$

در این رابطه،  $\nabla$  عملگر دیفرانسیلی،  $r = (x, y, z)$  بردار مکان،  $t$  متغیر زمان،  $C(r)$  تانسور الاستیسیته وابسته به مکان،  $\rho(r)$  چگالی و  $u(r)$  بردار جابه‌جایی هستند.

## ۲-۲- تئوری بلاخ-فلوکه

بریلوئن<sup>۱</sup> [۳۶] از اولین محققینی است که بر روی مفهوم انتشار امواج در ساختارهای متناوب مطالعه کرده است. او در سال ۱۹۴۶ به اهمیت بردار موج و فرکانس انتشار موج در انتشار امواج در ساختارهای متناوب پی برد. او همچنین دریافت که در این ساختارهای متناوب می‌توان تنها یک واحد تکرار شونده یا سلول واحد را در نظر گرفت و با تغییر بردار موج و فرکانس انتشار امواج در این سلول واحد به بررسی یک شبکه بی نهایت تکرار شونده متشکل از سلول واحد پرداخت. او این سلول واحد را که کوچکترین واحد تکرار شونده در شبکه می‌باشد را ناحیه اول بریلوئن<sup>۲</sup> نامید. برای بررسی این ساختارهای متناوب از مفاهیم و تئوری‌های فیزیک حالت جامد استفاده می‌شود. یکی از این تئوری‌ها تئوری بلاخ-فلوکه می‌باشد [۳۷]. به کمک

1 Brillouin  
2 First Brillouin zone

یافتن این نواحی به عنوان هدف این تحقیق برای جلوگیری از انتشار موج در ساختارهای متناوب در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۴- جداسازی امواج سطحی

در مدلسازی‌هایی که به منظور به دست آوردن شکاف باند برای امواج سطحی انجام می‌شوند، از آنجایی که نمودار پراکندگی فرکانس‌های ویژه، مانند شکل ۲، شامل انواع مختلف موده‌های سطحی و موده‌های حجمی هستند، لازم است تا یک مرحله پس پردازش<sup>۲</sup> به منظور جداسازی موده‌های سطحی از سایر مودها انجام شود. لازم به ذکر است که نمودار پراکندگی بیانگر فرکانس‌های ویژه مربوط به سلول واحد با در نظر گرفتن تغییرات بردار موج بلاخ فلوک می‌باشد که نمودار شکل ۲، مربوط به سلول واحد بررسی شده در این تحقیق می‌باشد. این نمودار شامل تمام موده‌های سطحی و حجمی است و لازم است تا موده‌های سطحی آن با استفاده از یک روش پس پردازش مناسب که در ادامه شرح داده می‌شود، از موده‌های حجمی جدا شوند. برای جداسازی امواج سطحی پارامتر به منظور نشان دادن توزیع انرژی در فرکانس ویژه مورد بررسی، تعریف می‌شود [۳۳]:

$$\xi = \frac{\int_{0.1h} E_{\varepsilon} dA}{\int_h E_{\varepsilon} dA} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)،  $h$  بیانگر ارتفاع سلول واحد مورد بررسی،  $E_{\varepsilon}$  بیانگر چگالی انرژی کرنشی و  $dA$  نشان دهنده جز دیفرانسیل سطح تحت انتگرال‌گیری می‌باشند. پارامتر  $\xi$  نشان دهنده نسبت میزان انرژی موجود تا عمق  $0.1h$  از سلول واحد به میزان انرژی موجود در کل سلول واحد می‌باشد. واضح است که این عدد می‌تواند مقداری بین صفر و ۱ داشته باشد. همچنین این مقدار، معنی فیزیکی قابل درکی را ارائه می‌دهد. به این شکل که هر چقدر به ۱ نزدیک‌تر باشد به این معنی است که مقدار بیشتری از انرژی ذخیره شده در سلول واحد نزدیک به سطح سلول واحد قرار دارد و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد انرژی موجود در سلول واحد در عمق‌های پایین‌تر ذخیره شده است. در این تحقیق عدد  $0.5$  به عنوان مرز بین امواج سطحی و سایر امواج در نظر گرفته شده است. به این معنی که اگر بیش از  $50\%$  انرژی یک مقدار ویژه با بردار موج متناظرش در  $10\%$  بالایی عمق سلول واحد قرار

در این رابطه  $\mathbf{u}_k(r)$  تابع مدولاسیون بردار جابجایی،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $k$  بردار موج هستند. بردار موج در ناحیه اول بریلوئن امکان جابه‌جایی دارد. همچنین ثابت تناوبی تابع مدولاسیون برابر با  $R$  در نظر گرفته می‌شود و در یک ساختار متناوب برای تابع مدولاسیون می‌توان نوشت:

$$u_k(r) = u_k(r + R) \quad (۳)$$

با حل معادله‌های (۲) و (۳) رابطه‌ی (۴) حاصل می‌شود. این معادله به عنوان شرایط مرزی متناوب<sup>۱</sup> در این تحقیق استفاده می‌شود و با استفاده از آن یک سلول واحد می‌تواند یک شبکه نامحدود تکرار شونده‌ی متناوب از آن سلول واحد را نمایندگی کند و مسئله پیچیده شبکه بی نهایت تبدیل به مسئله ساده‌تر بررسی یک سلول واحد می‌شود. این معادله باعث اختلاف فاز جابه‌جایی در دو طرف سلول واحد به اندازه  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{R}$  می‌شود [۳۸].

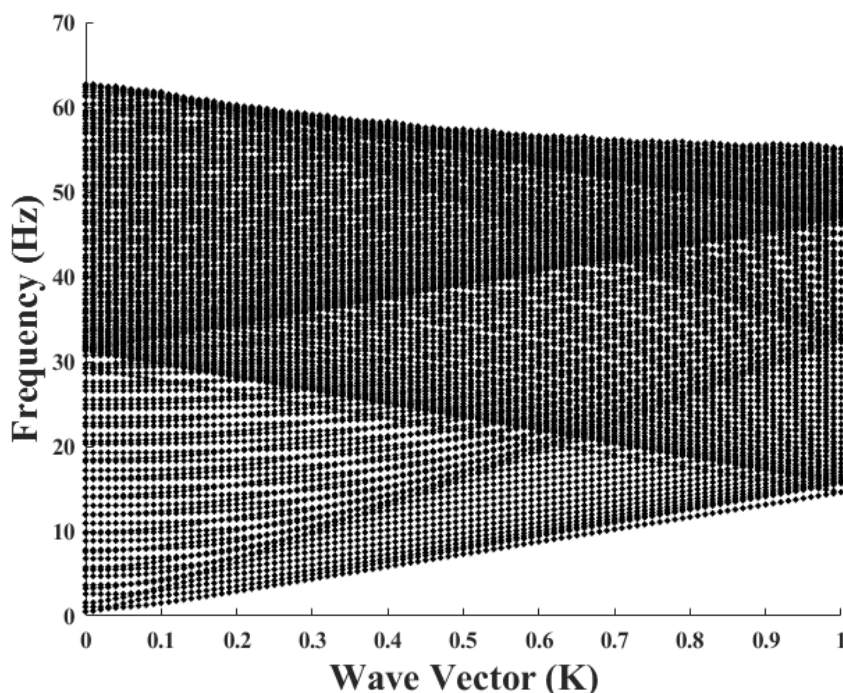
$$u(r + R, t) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{R})} u(r, t) \quad (۴)$$

## ۲-۳- رابطه پراکندگی

با ترکیب معادله انتشار امواج (معادله (۱)) و معادله شرایط مرزی (معادله (۴)) یک مسئله فرکانس ویژه به دست می‌آید که به صورت زیر بیان می‌شود [۳۲]:

$$(\phi(K) - \omega^2 M) \cdot U = 0 \quad (۵)$$

در این معادله  $\Phi(k)$  ماتریس سختی وابسته به بردار موج و  $M$  ماتریس جرم سلول واحد هستند. با توجه به معادله (۵) و با تغییر بردار موج ( $K$ ) می‌توان فرکانس‌های ویژه متناظر را به دست آورد. با توجه به تئوری ساختارهای متناوب، بردار موج می‌تواند فقط در ناحیه اول بریلوئن تغییر کند. در این تحقیق، با توجه به اینکه سلول واحد تنها در یک جهت تکرار می‌شود کافی است بردار موج نیز تنها در این راستا در بازه‌ی  $+\pi/a$  تا  $-\pi/a$  تا تغییر کند که در آن بیانگر ثابت تناوب است. سپس با رسم نمودار فرکانس‌های ویژه بر حسب بردار موج نواحی فرکانسی که فاقد فرکانس ویژه هستند به عنوان شکاف باند یا ناحیه کاهش قابل تشخیص می‌باشند.



شکل ۲. نمودار پراکندگی قبل از انجام مرحله پس پردازش

Fig. 2. Dispersion curve before post-processing

فرکانس‌های ویژه مربوطه به دست آمده است. پس از آن با انجام یک مرحله پس پردازش مودهای سطحی جدا شده و شکاف باند مربوطه به دست آمده است. نتایج حاصل از مدلسازی مطالعه آنها و نتایج مدلسازی تحقیق حاضر در شکل ۴ نمایش داده شده اند. مطابقت نتایج حاصل، صحت مدلسازی های تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در واقع مطابقت این نتایج بیانگر این است که استخراج نمودار پراکندگی (رابطه‌ی (۵)) و عملیات پس پردازش (رابطه‌ی (۶)) به درستی صورت گرفته است.

#### ۴- تعریف مسئله

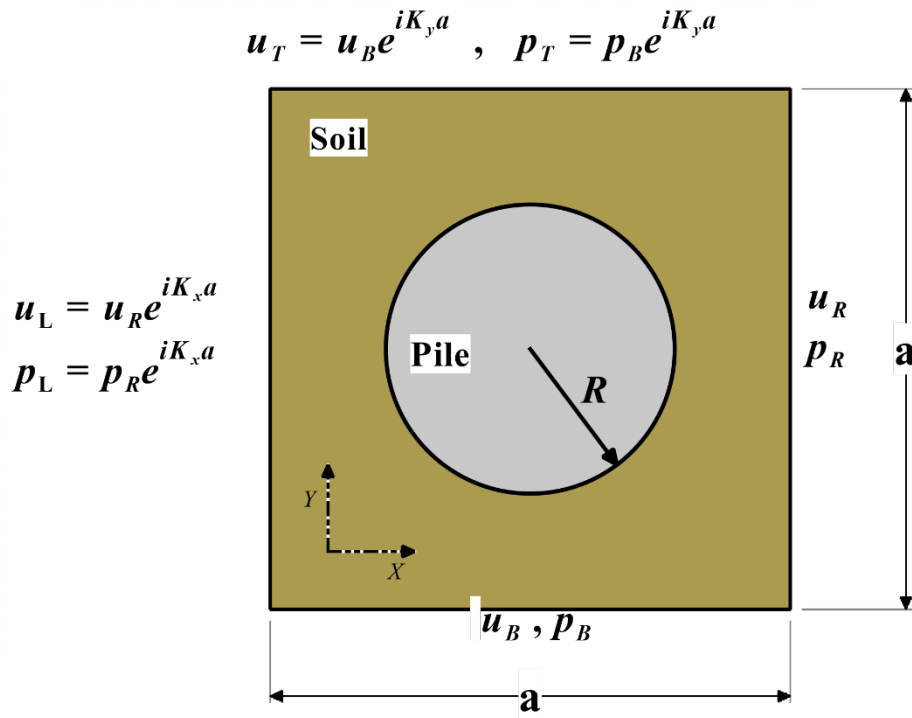
هدف اصلی در این مطالعه، استفاده از یک مانع موج متناوب به منظور محافظت از ساختمان‌های حساس در مقابل اثرات نامطلوب انتشار امواج لرزه‌ای می‌باشد. بر خلاف روند کلی در طراحی مانع موج، که معمولاً مانع موج مانند شمع‌های مدفون در زمین توسط خاک احاطه می‌شوند، در تحقیق حاضر سعی شده است که، به عنوان یک نوآوری، هسته خاک طبیعی در مرکز مانع حفظ شده و اطراف آن با مصالح سبک‌تر و نرم‌تر احاطه شود.

داشته باشد، آن حالت به عنوان مود سطحی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که صحت نحوه انتخاب پارامتر  $\xi$  در مطالعات صحت سنجی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای آن به دست آمده است.

#### ۳- صحت سنجی مدلسازی

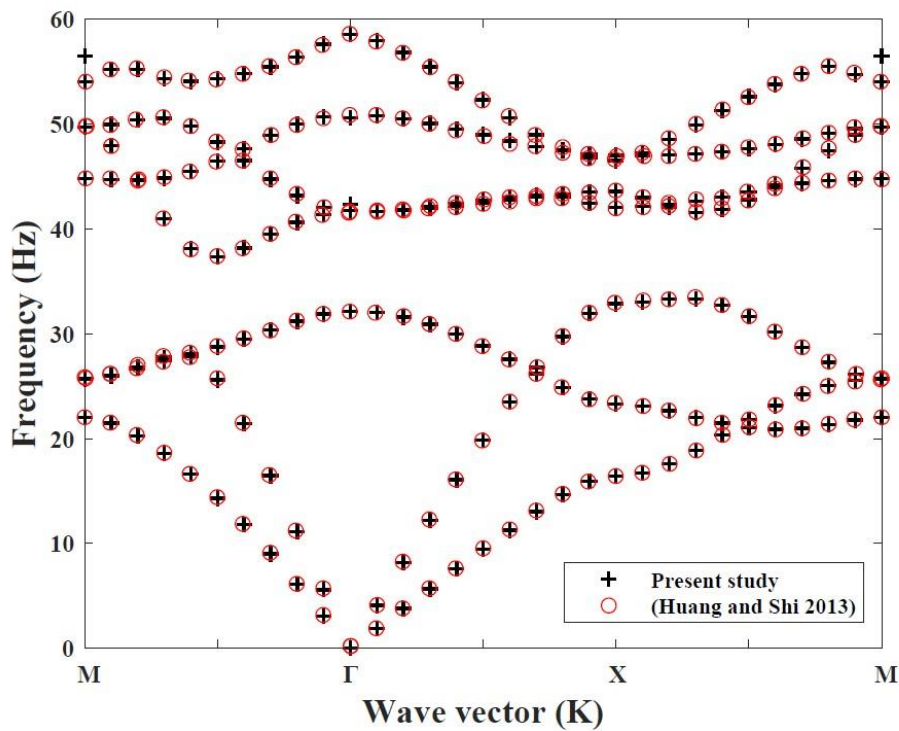
به منظور اعتبار سنجی مدلسازی ها، مقایسه‌ای بین نتایج شیوه مدلسازی تحقیق حاضر و نتایج مطالعه انجام شده توسط هانگ و پو [۱۷] انجام شده است. یک سلول واحد دوبعدی که در راستای X و Y تکرار می‌شود را در نظر گرفتند و با به دست آوردن فرکانس‌های ویژه نمودار پراکندگی را رسم کردند. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، آنها یک سلول واحد با ابعاد ۲ m در ۲ m با ثابت تناوبی ۲ m و یک شمع دایره‌ای با شعاع ۶۵ cm را در نظر گرفتند. سلول واحد از خاک و شمع از بتن با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ تشکیل شده‌اند. آنها سپس با به دست آوردن فرکانس‌های ویژه متناظر با بردارهای موج نمودار پراکندگی را رسم کردند. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار عددی اجزا محدود COMSOL و مشخصات ذکر شده این سلول واحد شبیه سازی شده، سپس با تغییر بردار موج، در هر بردار موج





شکل ۳. سلول واحد در نظر گرفته شده جهت صحت سنجی

Fig. 3. Considered unit cell for the verification



شکل ۴. نمودار پراکندگی حاصل از مطالعه اعتبار سنجی

Fig. 4. Dispersion curve for the verification problem

جدول ۱. مشخصات مصالح مربوط به مسئله صحت سنجی

Table 1. Material properties for the verification problem

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته خاک	$E_s$	MPa	۲۰
نسبت پواسون خاک	$\nu_s$	N/A	۰/۳۵
چگالی خاک	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	۱۹۰۰
مدول الاستیسیته بتن	$E_c$	GPa	۳۰
نسبت پواسون بتن	$\nu_c$	N/A	۰/۲
چگالی بتن	$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>	۲۵۰۰

جدول ۲. مشخصات مصالح در نظر گرفته شده به منظور مدل‌سازی سلول واحد پیشنهادی [۲۰، ۳۵]

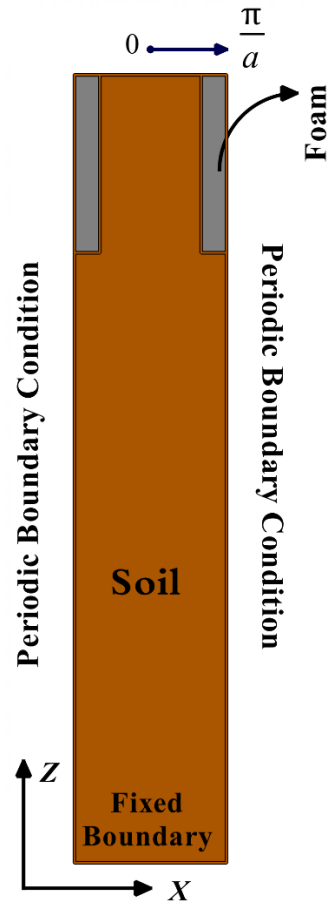
Table 2. Material properties for the proposed unit cell [20, 35]

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
مدول الاستیسیته خاک	$E_s$	MPa	۲۰
نسبت پواسون خاک	$\nu_s$	N/A	۰/۳۵
چگالی خاک	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	۱۹۰۰
مدول الاستیسیته فوم	$E_c$	MPa	۱۰
نسبت پواسون فوم	$\nu_c$	N/A	۰/۴۵
چگالی فوم	$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>	۱۱۵
سرعت موج رایلی در خاک	$c_R$	m/s	۵۸/۳

شعاعی وجود دارد. همچنین از آنجا که هدف اصلی استفاده از موانع موج در مقاله حاضر، کاهش ارتعاشات با فرکانس بالا و کرنش کوچک هستند، رفتار مصالح خاک و فوم به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. از آنجا که مدل‌سازی یک شبکه بی نهایت متناوب از موانع موج هزینه محاسباتی بالایی دارد، در ابتدا تنها یک سلول واحد از این موانع موج بررسی می‌شود. پس از بررسی این سلول واحد و به‌دست آوردن نمودار پراکندگی و انجام پس پردازش روی این نمودار، شکاف باندها برای سلول واحد مد نظر به‌دست می‌آیند. این شکاف باندها بیانگر نواحی‌ای هستند که انتظار می‌رود سلول واحد اجازه انتشار امواجی با فرکانسی در این محدوده را ندهند. در ادامه از آنجایی که ساخت یک شبکه بی نهایت از این سلول واحد و مانع

سلول واحد یا مانع موج مورد بررسی در این مطالعه از یک لایه فوم<sup>۱</sup> در دو طرف خاک تشکیل شده است. این سلول واحد می‌تواند از خاک بین فوم‌ها به‌عنوان یک هسته سنگین و از فوم‌ها به‌عنوان پوشش نرم استفاده کند. سلول واحد مورد بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین مشخصات مصالح مورد استفاده برای فوم و خاک نیز در جدول ۲ ذکر شده اند. به منظور مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین مشخصات مصالح مورد استفاده در این تحقیق از مصالح استفاده شده در تحقیقات پیشین استفاده شده است. لازم به ذکر است که از میرایی مادی در مقاله حاضر صرف‌نظر شده است و فقط به علت پخش انرژی موج در محیط، میرایی

1 Foam



شکل ۵. سلول واحد

Fig. 5. Unit cell

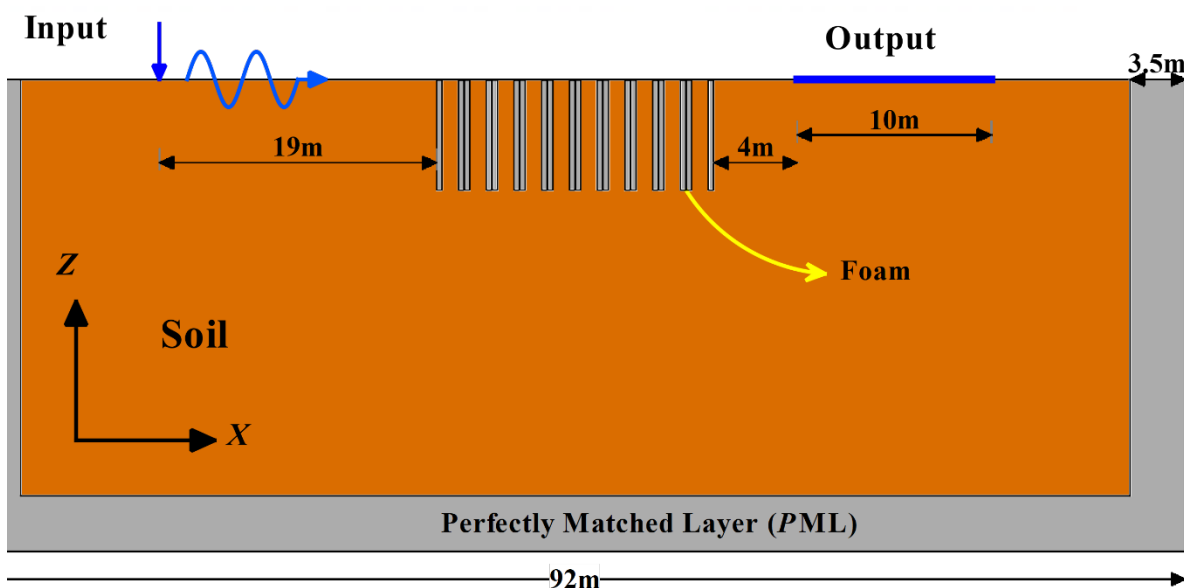
#### ۴-۱- سلول واحد مورد بررسی

طبق نظریه‌های بریلوئن، به علت تقارن سلول واحد می‌توان تنها بردار موج را در یک نیمه از این سلول واحد تغییر داد. کوچکترین قسمت ناحیه اول بریلوئن که تغییر بردار موج در آن به علت تقارن سلول واحد می‌تواند تمام حالات ممکن تغییر بردار موج در سلول واحد را نمایندگی کند، ناحیه بریلوئن ناکاستنی اول<sup>۱</sup> نامیده می‌شود [۳۶، ۳۷]. در تحقیق حاضر، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، کافی است بردار موج در فاصله  $0$  تا  $\pi/a$  در جهت افقی تغییر کند. با تغییر بردار موج در هر مرحله فرکانس‌های ویژه متناظر با آن با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود در نرم افزار COMSOL [۳۹] به دست می‌آیند. سپس با انجام مرحله پس پردازش و جداسازی امواج سطحی، نمودار پراکندگی برای امواج سطحی رسم می‌شود. اگر در این نمودار، محدوده‌ای از فرکانس‌ها فاقد وجود فرکانس ویژه باشند، این نواحی

موج در عمل غیر ممکن است، شبکه‌ای با تعداد محدودی از این موانع موج مطابق شکل ۶ مدل‌سازی شده و عملکرد آن در دو مطالعه‌ی حوزه زمان و فرکانس بررسی می‌شود. به عبارت دیگر، در مسائل واقعی، برای درک بهتر فیزیک مسئله لازم است تا تحلیل حوزه زمان صورت گیرد. به این دلیل سعی شده است تا رفتار مجموعه‌ای از سلول‌ها تحت اثر یک بارگذاری تاریخچه زمانی بررسی شود. از سوی دیگر برای به دست آوردن شکاف باند یک سلول و اطمینان از صحت نتایج، لازم است تا تحلیل‌هایی در حوزه فرکانس صورت گیرد. در واقع تمام نمودارهای پراکندگی با استفاده از تحلیل در حوزه فرکانس به دست می‌آیند. همچنین لازم است تا برای تعیین تعداد سلول‌های لازم در شبکه محدود و مطابقت شکاف‌باند آن با سلول واحد از تحلیل در حوزه فرکانس استفاده شود. به منظور مدل‌سازی‌های این مقاله از نرم‌افزار اجزا محدود COMSOL استفاده شده است. در ادامه در مورد شرایط مرزی و سایر پارامترهای مورد نیاز برای این مدل‌سازی‌ها بحث خواهد شد.

1 First irreducible Brillouin zone





شکل ۶. شبکه‌ی محدود موانع موج

Fig. 6. Finite lattice of wave barriers

منطبق<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. این لایه در واقع شرایط بی نهایت بودن محیط را مدل می‌کند. در نتیجه از بازگشت امواج از مرزها جلوگیری کرده و باعث شبیه سازی مسئله واقعی می‌شود. برای بررسی اثر موانع موج، یک ناحیه با طول ۱۰ m بعد از موانع به جهت بررسی موج خروجی در نظر شده است. ابعاد و شرایط مرزی و دیگر جزئیات مدل سازی به صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که ابعاد کلی مدل و شرایط مرزهای نامحدود (PML) استفاده شده در شکل ۶ با استفاده از تحلیل حساسیت به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شدت امواج بازگشتی به محیط حداقل شده و از طرفی هزینه محاسباتی حداقل گردد. فواصل بین بار و موانع (۱۹ m) و موانع و مرکز نقاط خروجی (۵ m + ۴ m) با توجه به مطالعات قبلی [۲۰، ۲۶، ۳۴، ۴۰] و برای تضمین شکل گیری و انتشار امواج در قبل و بعد از موانع به ترتیب حدود ۵ و ۲ برابر طول موج رایلی انتخاب شده اند. سرعت موج رایلی در خاک با استفاده از رابطه  $C_R = \sqrt{\frac{E_s}{2\rho_s(1+\nu_s)}} \left( \frac{0.862+1.14\nu}{1+\nu} \right)$  به دست می‌آید و مطابق جدول ۲ برابر  $58/3 \text{ m/s}$  است. با توجه به اینکه بازه فرکانس شکاف باند بین ۱۳ Hz تا ۱۷ Hz است، با در نظر گرفتن فرکانس متوسط که ۱۵ Hz است، طول موج رایلی حدود  $4m \approx \frac{58.3}{15}$  است.

به عنوان شکاف باند یا ناحیه‌ی کاهش شناخته می‌شوند. برای مدل سازی سلول واحد در نرم افزار COMSOL شرایط مرزی متناوب بر مرزهای چپ و راست آن اعمال می‌شوند تا تکرار این سلول واحد در دو سمت به میزان بی نهایت را شبیه سازی کند. همچنین برای مرز پایینی سلول واحد از شرایط مرزی ثابت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. مرز بالایی سلول واحد نیز دارای شرایط سطح آزاد<sup>۲</sup> می‌باشد. شکل شماتیک سلول واحد و شرایط مرزی اعمال شده بر آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. ثابت تناوب سلول واحد (عرض آن) ۲ m و ارتفاع آن ۳۰ m در نظر گرفته شده است. همچنین یک لایه فوم به ضخامت ۲۵ cm و ارتفاع ۴ m در هر طرف استفاده شده است.

#### ۴-۲- مدل سازی شبکه محدودی از موانع

با توجه به نتایج مدل سازی سلول واحد، انتظار می‌رود که مانع موج پیشنهادی بتواند امواجی را که فرکانس انتشار آنها در محدوده‌ی شکاف باند یا ناحیه کاهش قرار دارد را کاهش دهند. برای بررسی عملکرد و کارایی سلول واحد پیشنهادی در یک مسئله واقعی، شبکه‌ای متشکل از ۱۰ سلول واحد در کنار هم مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده است. در مرزهای چپ، راست و پایین این مدل یک ناحیه به ضخامت  $3/5 \text{ m}$  از نوع لایه کاملاً

3 Perfectly matched layer

1 Fixed Boundary condition  
2 Free surface

#### ۴-۳- مطالعه حوزه فرکانس

با استفاده از مدل محدود و اعمال یک بار هارمونیک با دامنه یک نیوتون در راستای قائم، شبکه محدود در حوزه فرکانس و در بازه صفر تا ۲۵ هرتز (Hz) انجام می‌شود. این مطالعه یک بار با در نظر گرفتن موانع و بار دیگر بدون در نظر گرفتن آنها انجام می‌شود. سپس در هر فرکانس، نسبت جابه‌جایی در راستای قائم در مدل با مانع به مدل بدون مانع یا همان ضریب کاهش دامنه<sup>۱</sup> در هر نقطه در محدوده‌ی خروجی مطابق رابطه (۷) به دست می‌آید [۱]. همچنین با انتگرال گیری روی تمام سطح ناحیه خروجی<sup>۲</sup> طبق رابطه (۸) و محاسبه این مقدار در واحد دسی بل<sup>۳</sup> طبق رابطه (۹) نمودار طیف کاهش دامنه<sup>۴</sup> رسم می‌شود [۴۱].

$$AR = \frac{\|U_{soil-foam}\|}{\|U_{soil-without-foam}\|} \quad (7)$$

$$\overline{AR} = \frac{1}{A} \int_{output} AR \quad (8)$$

$$ARS(dB) = 20 \log_{10}(\overline{AR}) \quad (9)$$

#### ۴-۴- مطالعه حوزه زمان

در این قسمت، شبکه محدود نشان داده شده در شکل ۶ تحت یک بارگذاری وابسته به زمان مطابق شکل ۷، قرار گرفته و عملکرد موانع موج در حوزه زمان نیز بررسی می‌شود. فرکانس غالب این بارگذاری ۱۵ Hz است و بارگذاری در نقطه ورودی<sup>۵</sup> در شکل ۶ وارد شده است. این فرکانس به این دلیل انتخاب شده است که حدودا در مرکز ناحیه‌ی فرکانسی شکاف‌باند قرار می‌گیرد و می‌تواند نحوه عملکرد شبکه محدود در حوزه زمان در بازه شکاف‌باند را بررسی کند. همچنین در نقطه‌ی ابتدایی ناحیه خروجی<sup>۶</sup>

- 1 Amplitude reduction factor (AR)
- 2 Output zone
- 3 decibel (dB)
- 4 Amplitude reduction spectra (ARS)
- 5 Input
- 6 Output

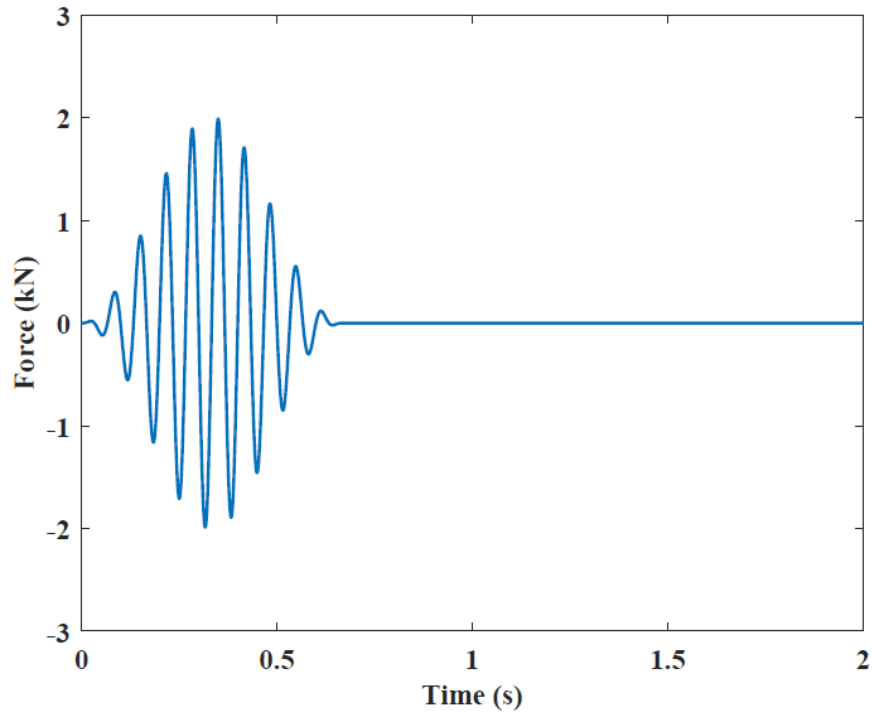
جابه‌جایی قائم در طول زمان ضبط می‌شود. این کار یک بار در حضور موانع و بار دیگر بدون حضور موانع انجام شده تا با رسم نمودار جابه‌جایی قائم در هر دو حالت و مقایسه آنها میزان تأثیر گذاری موانع موج بررسی شود.

#### ۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از مدلسازی های اجزاء محدود مربوط به شبکه‌های نامحدود و محدود مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

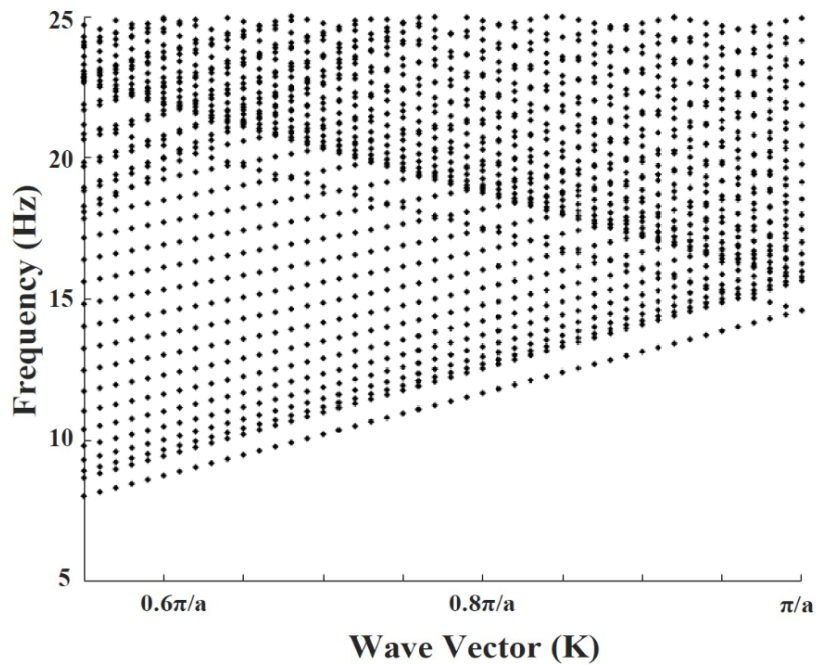
#### ۵-۱- نتایج نمودار پراکنندگی

نمودار پراکنندگی برای سلول واحد مورد نظر در شکل ۸ نشان داده شده است و ملاحظه می‌شود که هیچ شکاف باندی ندارد. دلیل این امر این است که نمودار مذکور شامل تمامی انواع موج از جمله سطحی و حجمی است. با انجام مرحله پس پردازش و جداسازی امواج سطحی، نمودار پراکنندگی برای امواج سطحی طبق شکل ۹ حاصل می‌شود. در نمودار نشان داده شده در شکل ۹ الف) مثلث‌های سیاه رنگ نمایش دهنده امواج سطحی یک سلول واحد بدون حضور فوم (یعنی فقط خاک) می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ ناحیه فرکانسی وجود ندارد که فاقد وجود امواج سطحی باشد. شکل ۹ ب) نشان دهنده نمودار پراکنندگی برای سلول واحد پیشنهادی است که دارای فوم به‌عنوان مانع موج (در اطراف خاک) می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در محدوده‌ی ۱۲/۷۵ Hz تا ۱۷/۶۱ Hz هیچ مود سطحی‌ای وجود ندارد. در نتیجه این ناحیه به‌عنوان شکاف باند تشخیص داده می‌شود. شکل ۹ الف) با مقایسه امواج سطحی برای حالت با و بدون موانع بخوبی تأثیر حضور موانع را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدا و در شرایط عدم حضور موانع موج دو شاخه‌ی امواج سطحی به هم رسیده‌اند و هیچ فضای خالی‌ای بین این دو شاخه وجود ندارد. در نتیجه امکان یافتن شکاف‌باند نیز غیر ممکن است. اما پس از استفاده از موانع موج، دو شاخه امواج سطحی از هم فاصله گرفته و بین آن دو ناحیه‌ای از فرکانس ایجاد می‌شود که هیچ فرکانس ویژه‌ای وجود ندارد. در نتیجه این ناحیه را می‌توان شکاف‌باند نامید و انتظار داشت امواجی با فرکانس غالب در این ناحیه امکان انتشار در شبکه‌ی موانع موج را نداشته باشند. شکاف‌باند بدست آمده دارای پهنایی در حدود ۵ Hz و در ناحیه زیر ۲۰ Hz می‌باشد که ناحیه مطلوبی برای کاهش امواج لرزه‌ای می‌باشد.



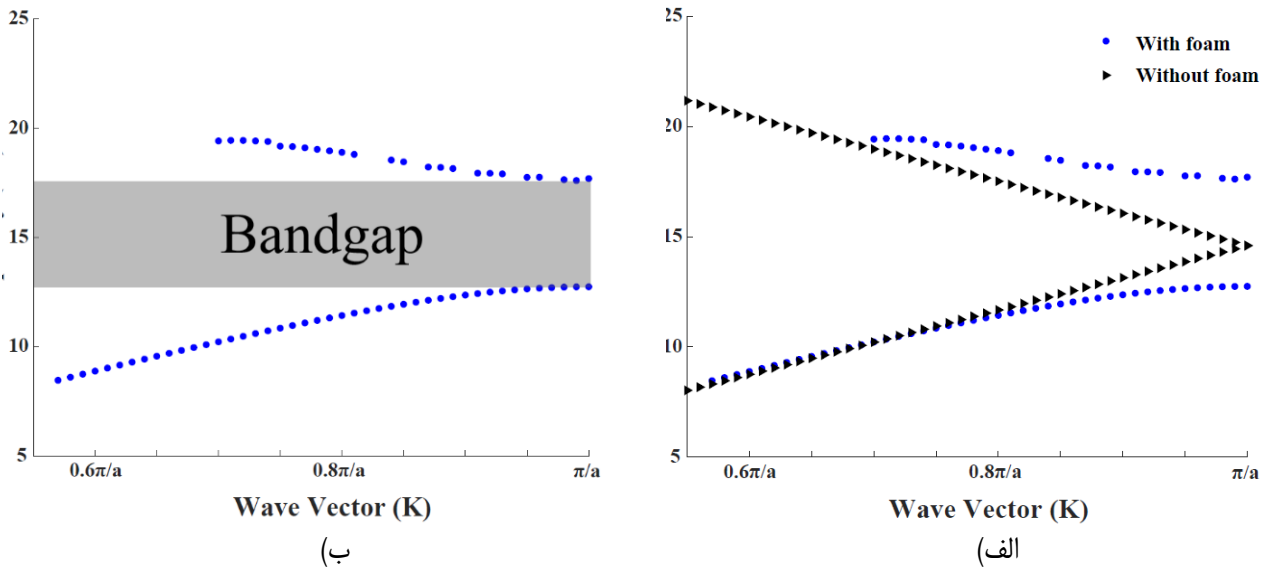
شکل ۷. بارگذاری استفاده شده در مطالعه حوزه زمان

Fig. 7. Loading for the time domain analysis



شکل ۸. نمودار پراکندگی بدون پس پردازش

Fig. 8. Dispersion curve without post-processing



شکل ۹. نمودار پراکندگی امواج سطحی: الف) مقایسه حالت با و بدون فوم، ب) شکاف باند در سلول واحد با فوم

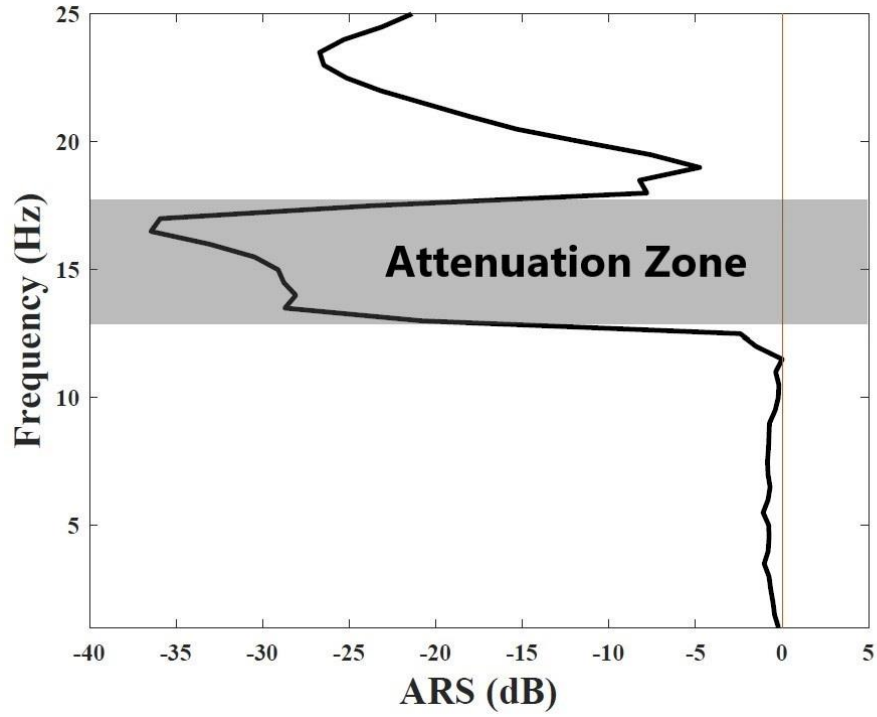
Fig. 9. Surface waves dispersion curve: a) comparison between the cases with and without foam, b) bandgap in the unit cell containing foam

#### ۵-۲- نتایج مطالعه حوزه فرکانس

در این بخش نتایج مطالعه حوزه فرکانس بیان می‌شود. انجام این مطالعه از این جهت اهمیت دارد که به جای یک شبکه بی‌نهایت غیر واقعی یک شبکه با تعداد محدودی از موانع مورد بررسی قرار می‌گیرد و شرایطی نزدیک‌تر به مسائل واقعی را شبیه‌سازی می‌کند. با انجام مطالعه حوزه فرکانس در بازه‌ی صفر تا ۲۵ Hz روی مدل شبکه‌ی محدود مقدار طیف کاهش دامنه در هر فرکانس به دست می‌آید. با رسم این مقادیر بر حسب فرکانس نمودار طیف کاهش دامنه همانطور که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، به دست می‌آید. در این نمودار در بازه‌ی ۱۲/۵ Hz تا ۱۷/۵ Hz طیف کاهش دامنه کاهش انتشار امواج را به خوبی نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی این نمودار با نمودار پراکندگی رسم شده در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که مطابق انتظار، هنگامی که فرکانس انتشار موج در شکاف باند قرار می‌گیرد، در شبکه محدود نیز کاهش انتشار امواج مشاهده می‌شود و این امر نشان می‌دهد که استفاده از سلول واحد به صورت متناوب حتی در شبکه‌های محدود نیز کارایی لازم را دارد. همچنین مطابقت محدوده فرکانسی ایجاد شده در نمودار طیف کاهش دامنه با نمودار پراکندگی نشان می‌دهد که این کاهش در انتشار امواج کاملاً مطابق تئوری‌های متناوب استفاده شده است.

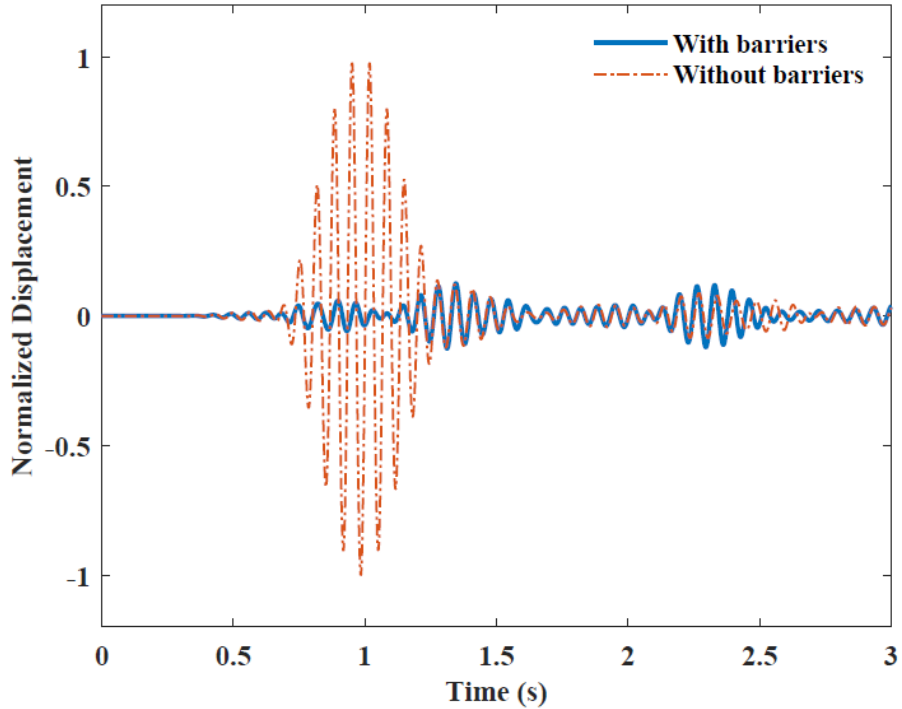
#### ۵-۳- نتایج مطالعه حوزه زمان

با اعمال بارگذاری نمایش داده شده در شکل ۷ به صورت قائم در نقطه‌ی ورودی شبکه‌ی محدود سلول واحد پیشنهادی در حوزه زمان بررسی شده است. همانطور که گفته شد، فرکانس غالب بارگذاری ۱۵ Hz است که با توجه به شکاف باند به دست آمده به صورت تقریبی در مرکز آن قرار دارد و می‌تواند عملکرد سلول واحد در ناحیه کاهش ایجاد شده را بررسی کند. برای بررسی راحت‌تر، تمام مقادیر جابه‌جایی روی محور قائم بر بیشینه جابه‌جایی به دست آمده در مدل بدون مانع موج تقسیم شده‌اند [۲۸]. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود هنگام استفاده از موانع موج پیشنهادی جابه‌جایی قائم در نقطه خروجی کاهش قابل توجهی یافته است. به صورتی که میزان حداکثر جابه‌جایی هنگام استفاده از سلول واحد پیشنهادی ۰/۸۷٪ کاهش یافته است. در نتیجه مانند مطالعه حوزه فرکانس، مطالعه حوزه زمان نیز نشان می‌دهد که استفاده از شبکه محدود می‌تواند باعث کاهش انتشار امواج در صورت استفاده از سلول واحد شود. همچنین برای بررسی بیشتر تأثیر این موانع در مطالعه حوزه زمان، طیف جابجایی در دامنه مسئله در زمان ۰/۷ S برای هر دو مدل با مانع و بدون مانع در شکل ۱۲ رسم شده اند. با مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که هنگام رسیدن موج به موانع انتشار موج قسمتی از موج که تحت عنوان موج سطحی شناخته می‌شود نمی‌تواند وارد موانع شود.



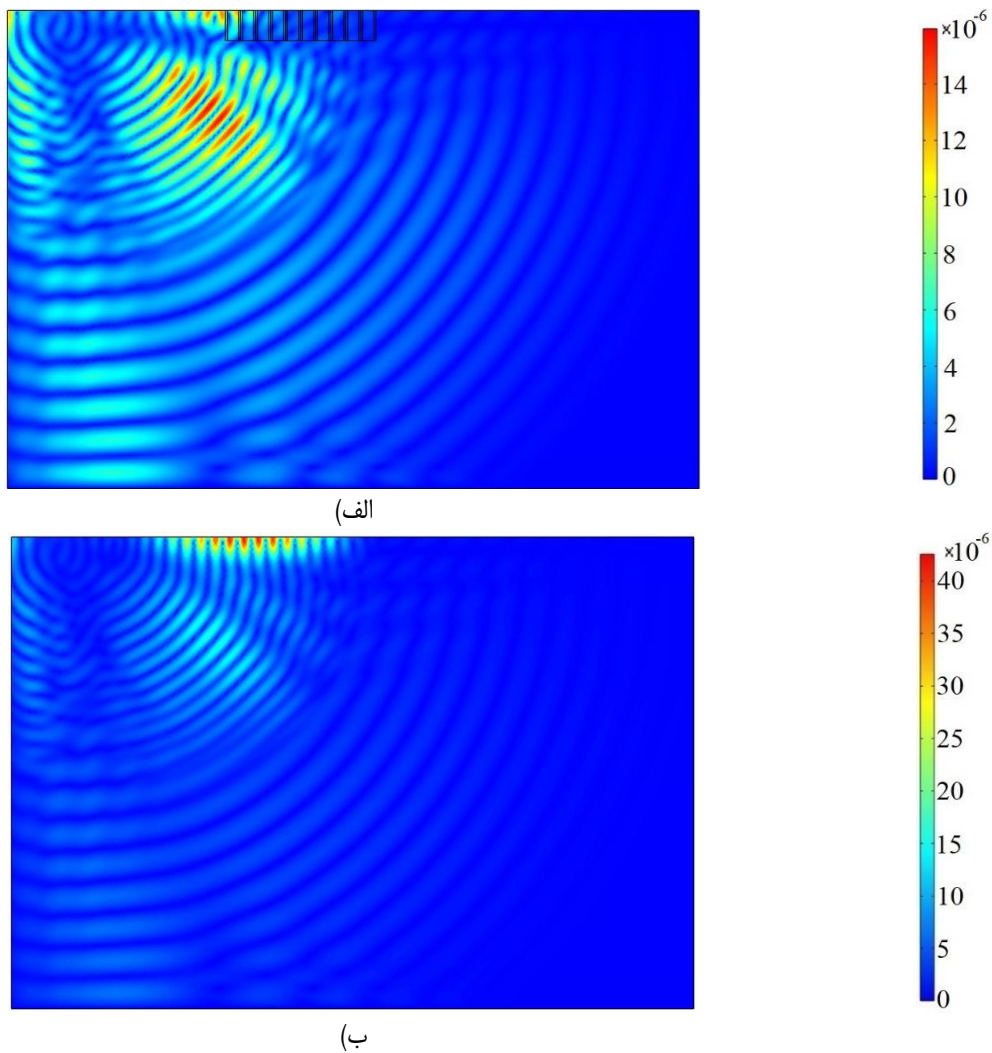
شکل ۱۰. نمودار طیف کاهش دامنه در مطالعه حوزه فرکانس

Fig. 10. Amplitude reduction spectrum curve in the eigenfrequency analysis



شکل ۱۱. جابه‌جایی در نقاط خروجی در مطالعه حوزه زمان

Fig. 11. Displacements in the output points in time domain analysis



شکل ۱۲. طیف جابجایی در دامنه مسئله جابه‌جایی بر حسب متر (m) در زمان ۰٫۷ ثانیه (s) برای الف) مدل بدون مانع، ب) مدل با مانع

Fig. 12. Displacement amplitude contour in meters (m) after 0.7 seconds for a) model without barriers, b) model with barriers

### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق یک سلول واحد جدید برای کاهش انتشار امواج سطحی و اثرات نامطلوب آن پیشنهاد شده است. در این سلول واحد از خاک دست‌نخورده در مرکز سلول واحد و از فوم در طرفین آن استفاده شده است. سپس با استفاده از تئوری‌های موجود در فیزیک حالت جامد و

لازم به ذکر است که مسئله مورد مطالعه در مقاله حاضر با استفاده از تئوری‌های الاستودینامیک و روش اجزا محدود دینامیکی حل شده است. با استفاده از این روش حل و با انتخاب گام زمانی و اندازه مش مناسب، کلیه پدیده‌های انعکاس و انکسار موج در ناپیوستگی‌های هندسی و مصالح و همچنین مرزهای محیط در نظر گرفته می‌شود



- Structural Dynamics, 10(2) (1982) 195-210.
- [4] M. Adam, O. Von Estorff, Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches, *Computers & Structures*, 83(1) (2005) 11-24.
- [5] M.-m. Sun, C. Chen, W.-y. Chen, X. Ping, Analysis on multiple scattering by an arbitrary configuration of piles as barriers for vibration isolation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3) (2011) 535-545.
- [6] J. Avilés, F.J. Sánchez-Sesma, Foundation isolation from vibrations using piles as barriers, *Journal of Engineering Mechanics*, 114(11) (1988) 1854-1870.
- [7] F.E. Richart, J.R. Hall, R.D. Woods, *Vibrations of soils and foundations*, (1970).
- [8] Y.-Q. Cai, G.-Y. Ding, C.-J. Xu, Amplitude reduction of elastic waves by a row of piles in poroelastic soil, *Computers and Geotechnics*, 36(3) (2009) 463-473.
- [9] F. Yarmohammadi, R. Rafiee-Dehkharghani, An optimal design procedure of wave barriers for mitigation of underground and above-ground railway vibrations, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(11) (2020) 2050121.
- [10] K.M. Dolatshahi, A. Rezaie, R. Rafiee-Dehkharghani, Topology optimization of wave barriers for mitigation of vertical component of seismic ground motions, *Journal of Earthquake Engineering*, 24(1) (2020) 84-108.
- [11] F. Yarmohammadi, R. Rafiee-Dehkharghani, C. Behnia, A. Aref, Design of wave barriers for mitigation of train-induced vibrations using a coupled genetic-algorithm/finite-element methodology, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121 (2019) 262-275.
- [12] F. Yarmohammadi, R. Rafiee-Dehkharghani, C. Behnia, A. Aref, Topology optimization of jet-grouted overlapping columns for mitigation of train-induced ground vibrations, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 838-850.
- [13] A. Rezaie, R. Rafiee-Dehkharghani, K.M. Dolatshahi, S.R. Mirghaderi, Soil-buried wave barriers for vibration control of structures subjected to vertically incident shear waves, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109

با استفاده از تئوری‌های ساختارهای متناوب به بررسی عملکرد این سلول واحد پرداخته شده است. با استفاده از تئوری بلاخ-فلوکه انتشار امواج در یک شبکه بی‌نهایت بررسی می‌شود و نمودار پراکندگی مربوط به سلول واحد به دست می‌آید. سپس با استفاده از روش پس‌پردازش امواج سطحی مودهای مربوط به امواج سطحی جداسازی می‌شود و نمودار پراکندگی مربوط به امواج سطحی بخ دست می‌آید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که سلول واحد پیشنهادی می‌تواند با تولید شکاف باند و ناحیه کاهش مناسب، مانع انتشار امواج سطحی در بازه‌ی ۱۲/۷۵ Hz تا ۱۷/۶۱ Hz شود. سپس با انجام مطالعات حوزه زمان و حوزه فرکانس به بررسی عملکرد این سلول واحد در یک ساختار واقعی که شامل تعداد محدودی از موانع موج است پرداخته شده است. با انجام مطالعات حوزه فرکانس و زمان مانع موج پیشنهاد شده در یک شرایط واقعی‌تر و با استفاده از تعداد محدودی از موانع موج مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعات از یک بارگذاری قائم متناوب جهت ایجاد امواج سطحی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که دقیقاً در بازه‌ی شکاف باند ( ۱۲/۵ Hz تا ۱۷/۵ Hz ) در مطالعه حوزه فرکانس کاهش قابل توجهی در انتشار امواج مشاهده می‌شود و نمودار طیف کاهش دامنه به دست آمده با نمودار پراکندگی کاملاً مطابقت دارد. این امر نشان دهنده این است که شبکه محدود موانعی که با توجه به تحلیل شبکه بی‌نهایت ساخته می‌شوند توانایی کاهش امواج را دارند. همچنین با استفاده از یک بارگذاری وابسته به زمان، در بازه‌ی شکاف باند ۸۷٪ کاهش در مقدار جابه‌جایی در نقاط خروجی مشاهده می‌شود. از آنجا که در واقعیت اکثر بارگذاری‌ها به صورت تابعی از زمان می‌باشند، کاهش انتشار امواج در مطالعه‌ی حوزه زمان نشان دهنده کارایی شبکه موانع موج در شرایط واقعی‌تر می‌باشد. این پدیده، کارایی بسیار خوب موانع موج را حتی در صورت استفاده در شبکه‌های محدود را نشان می‌دهد.

## منابع

- [1] R.D. Woods, Screening of surface wave in soils, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 94(4) (1968) 951-979.
- [2] E. Çelebi, S. Firat, G. Beyhan, İ. Çankaya, İ. Vural, O. Kırtel, Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 29(5) (2009) 824-833.
- [3] T.W. May, B.A. Bolt, The effectiveness of trenches in reducing seismic motion, *Earthquake Engineering &*

- Engineering Vibration, 9(1) (2010) 75-82.
- [25] S. Amanat, R. Rafiee-Dehkharghani, Investigation of periodic resonators as wave barriers for mitigating surface seismic waves using Bloch-Floquet theory, Sharif Journal of Civil Engineering, (2023).
- [26] S. Amanat, R. Rafiee-Dehkharghani, M. Bitaraf, D. Bansal, Analytical and numerical investigation of finite and infinite periodic lattices for mitigation of seismic waves in layered grounds, International Journal of Engineering Science, 173 (2022) 103655.
- [27] Muhammad, T. Wu, C. Lim, Forest trees as naturally available seismic metamaterials: low frequency Rayleigh wave with extremely wide bandgaps, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 20(14) (2020) 2043014.
- [28] C. Lim, J. Reddy, Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium, Engineering Structures, 188 (2019) 440-451.
- [29] C. Lim, K.K. Žur, Wide Rayleigh waves bandgap engineered metabarriers for ground born vibration attenuation, Engineering Structures, 246 (2021) 113019.
- [30] M.M. Hajjaj, J. Tu, Wave attenuation study on a wide-band seismic metasurface using capped pillars, Comptes Rendus. Mécanique, 350(G2) (2022) 237-254.
- [31] K. Gholami, R. Rafiee-Dehkharghani, A. Ghalandarzadeh, Shear and compression waves screening in 2D for dry or saturated ground using periodic infinite and finite soil-foam barriers, Archive of Applied Mechanics, (2022) 1-21.
- [32] X. Pu, Z. Shi, A novel method for identifying surface waves in periodic structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 98 (2017) 67-71.
- [33] Y.-f. Liu, J.-k. Huang, Y.-g. Li, Z.-f. Shi, Trees as large-scale natural metamaterials for low-frequency vibration reduction, Construction and Building Materials, 199 (2019) 737-745.
- [34] X. Pu, Z. Shi, H. Xiang, Feasibility of ambient vibration screening by periodic geof foam-filled trenches, Soil (2018) 312-323.
- [14] S. Kattis, D. Polyzos, D. Beskos, Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18(1) (1999) 1-10.
- [15] S. Ahmad, T. Al-Hussaini, Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches, Journal of geotechnical engineering, 117(1) (1991) 67-88.
- [16] S. Amanat, K. Gholami, R. Rafiee-Dehkharghani, D. Bansal, Plane waves mitigation in saturated porous media using optimal periodic wave barriers, Applied Acoustics, 200 (2022) 109085.
- [17] J. Huang, Z. Shi, Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation, International Journal of Geomechanics, 13(2) (2013) 132-142.
- [18] X. Pu, Z. Shi, Periodic pile barriers for Rayleigh wave isolation in a poroelastic half-space, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 121 (2019) 75-86.
- [19] Q. Meng, Z. Shi, Propagation attenuation of plane waves in single-phased soil by periodic pile barriers, International Journal of Geomechanics, 18(6) (2018) 04018035.
- [20] Z. Shi, Y. Wen, Q. Meng, Propagation attenuation of plane waves in saturated soil by pile barriers, International Journal of Geomechanics, 17(9) (2017) 04017053.
- [21] X. Liu, Z. Shi, Y. Mo, Comparison of 2D and 3D models for numerical simulation of vibration reduction by periodic pile barriers, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 79 (2015) 104-107.
- [22] J. Huang, Z. Shi, Vibration reduction of plane waves using periodic in-filled pile barriers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(6) (2015) 04015018.
- [23] J. Huang, Z. Shi, Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for plane waves, Journal of Sound and Vibration, 332(19) (2013) 4423-4439.
- [24] G. Jia, Z. Shi, A new seismic isolation system and its feasibility study, Earthquake Engineering and

- & Structural Dynamics, 47(4) (2018) 925-944.
- [39] COMSOL, Multiphysics® v. 5.6. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [40] J. Huang, W. Liu, Z. Shi, Surface-wave attenuation zone of layered periodic structures and feasible application in ground vibration reduction, Construction and Building Materials, 141 (2017) 1-11.
- [41] X. Pu, Z. Shi, Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils, Construction and Building Materials, 180 (2018) 177-187.
- Dynamics and Earthquake Engineering, 104 (2018) 228-235.
- [35] C. Comi, L. Driemeier, Wave propagation in cellular locally resonant metamaterials, Latin American Journal of Solids and Structures, 15 (2018).
- [36] L. Brillouin, Wave propagation in periodic structures: electric filters and crystal lattices, (1946).
- [37] C. Kittel, P. McEuen, P. McEuen, Introduction to solid state physics, Wiley New York, 1996.
- [38] Z. Cheng, Z. Shi, Composite periodic foundation and its application for seismic isolation, Earthquake Engineering

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

K. Gholami, R. Rafiee-Dehkharghani, Surface waves attenuation using periodic buried soil-foam wave barriers, Amirkabir J. Civil Eng., 55(6) (2023) 1303-1320.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21261.7668](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21261.7668)



