

کاهش ارتعاشات در زمین‌های همگن و لایه‌لایه خشک و اشباع متخلخل با سطح آب زیرزمینی متغیر با استفاده از موانع موج

علیرضا اسماعیلی مقدم^۱، رضا رفیعی دهخوارقانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

rezarafiee@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳

چکیده

در مقاله حاضر به بررسی کاهش ارتعاشات زمین تحت اثر بارهای دینامیکی با استفاده از موانع موج نرم و سخت پرداخته شده است. برای در نظر گرفتن شرایط واقعی، زمین علاوه بر حالت همگن به صورت لایه‌لایه نیز مدل شده است. یکی از مهم‌ترین مواردی که در ارتعاشات زمین باید لحاظ شود اثر سطح آب زیرزمینی است. بدین منظور چند تراز مختلف برای سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی پدیده انتشار امواج در خاک اشباع از تئوری پوروالاستودینامیک بيو (Biot) و مدل‌سازی پیشرفته اجزا محدود استفاده شده است. موانع موج به دو صورت ترانشه‌های توخالی به عنوان موانع نرم و موانع بتنی به عنوان موانع سخت در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به حالت‌های بسیار متعدد، برای تعیین موقعیت و هندسه موانع نرم و سخت از الگوریتم بهینه‌سازی CMA-ES استفاده شده است. برای این منظور و به دست آوردن تابع بهینه‌سازی، مدل اجزا محدود پوروالاستودینامیک به عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی گنجانده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ترانشه‌های توخالی بیشتر از موانع بتنی میزان ارتعاشات را کاهش می‌دهند. علاوه بر آن در خاک‌های همگن، موانع موج بهینه بتنی در برخی حالت‌ها به صورت دال افقی قرار می‌گیرند در حالی که در خاک‌های لایه‌لایه این موانع به شکل ستونی قرار گرفته و مرز بین دولایه بالایی را قطع می‌کنند.

واژگان کلیدی: موانع موج، ارتعاشات، زمین لایه‌لایه، خاک اشباع، بهینه‌سازی، روش اجزا محدود.

مقدمه

مسئله کاهش میزان ارتعاشات ایجاد شده در زمین توسط ماشینهای دوار و یا عبور قطار، همواره یکی از مهم ترین دغدغه های مهندسان عمران بوده است. این ارتعاشات، به دو دسته لرزش ها با دامنه جابه جایی بزرگ و کوچک تقسیم می شوند. لرزش ها با دامنه بزرگ، معمولاً در اثر بارگذاری های زلزله و انفجار رخ داده و باعث خرابی های گسترده می شود. ارتعاشات با دامنه های کوچک، معمولاً در اثر بارگذاری های ترافیک و قطارهای روزمینی و زیرزمینی، ساخت و ساز و همچنین ماشین آلات دورانی ایجاد می شوند. ارتعاشات با دامنه های کوچک، اختلالاتی را در عملکرد دستگاه های حساس به لرزش ایجاد کرده و باعث سلب آرامش ساکنین اطراف محل انتشار موج می شود. یکی از بهترین و موثرترین روش های کاهش این ارتعاشات، استفاده از موانع موج در بین محل انتشار موج و سازه دریافت کننده موج است. مهم ترین عامل اثرگذار در عملکرد این موانع موج، تفاوت نسبت امپدانس مکانیکی در خاک و مانع موج است. هرچه نسبت امپدانس مانع موج با خاک اطراف بیشتر باشد، مانع موج، ارتعاشات بیشتری را کاهش داده و بطور کلی عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. به جز ویژگی های دینامیکی، مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد موانع موج، طول و عرض و موقعیت قرارگیری آن است. زمانی که موج از داخل خاک وارد یک مانع موج با مشخصات متفاوت نسبت به خاک می شود، تغییر زاویه داده و از مسیر خود منحرف می شود. بنابراین می توان با انتخاب موقعیت و هندسه مانع موج، پتانسیل کاهش ارتعاشات را افزایش داد. اگر مانع موج در محل مناسبی قرار گیرد، تغییر زاویه و مسیر موج، می تواند باعث کاهش ارتعاشات در محل مورد نظر شود. به طور عکس، اگر هندسه و موقعیت مانع نامناسب باشد، ارتعاشات نه تنها تعدیل نشده، بلکه ممکن است تشدید شوند. هدف اصلی از این پژوهش استفاده از موانع موج به منظور کاهش ارتعاشات ایجاد شده در اثر بارگذاری

هارمونیک ماشین آلات است. از رایج ترین موانع موج، می توان به ترانسه های باز [6-1]، مانع موج شمع بتنی [10-7] و مانع موج توپر [13-11، 4-6] اشاره کرد. وودز [1] از اولین پژوهشگرانی بود که درباره تأثیر موانع موج توخالی تحقیق کرد و در ادامه پژوهشگران دیگر با استفاده از روش های مختلف عددی، مانند روش های المان محدود و المان مرزی و همچنین روش های آزمایشگاهی، به تحقیق در حوزه موانع موج و پراکنده سازی موج درون خاک پرداختند. الزاوی و اناگار [5] از دیگر پژوهشگرانی بودند که با استفاده از آزمایش میدانی و مدل سازی عددی به مطالعه موانع موج ترانسه توخالی و پر شده از ژئوفوم پرداختند. ویت و همکاران [14] با استفاده از آزمایش میدانی و مدل سازی عددی به وسیله ستون های آهکی-سیمانی به عمق ۱۲ متر و خاکریز به ارتفاع چهار متر روی ستون ها سعی بر کاهش ارتعاش ناشی از حرکت قطار داشتند. آن ها در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که با این روش می توان بیشترین سرعت ذرات خاک را در فاصله ۳۰ متر از ریل راه آهن ۶۷ درصد کاهش داد. همچنین در این پژوهش نشان داده شد که ستون های آهکی-سیمانی در کاهش ارتعاشات بیشتر از خاکریز ساخته شده موثر است. بزکوز و همکاران [11] از اولین پژوهشگرانی بودند که در زمینه مانع موج با روش المان مرزی به تحقیق پرداختند. محققان بسیاری [15-17] نیز برای بررسی موانع موج از روش المان محدود استفاده کردند. از آنجا که در بسیاری از مسائل و پروژه های واقعی سطح آب زیرزمینی بالا است، برخی از پژوهشگران [7، 19-22] در سال های اخیر به مطالعه رفتار موانع موج در زمین های اشباع و تفاوت آن با زمین های خشک پرداخته اند. به طور کلی موانع موج به دو صورت نرم و سخت هستند. منظور از نرمی و سختی، مقایسه امپدانس مانع موج با خاک است، به شکلی که اگر مانع دارای امپدانس کمتر از خاک باشد به عنوان مانع نرم و اگر امپدانس آن بیشتر از خاک باشد به عنوان مانع سخت در نظر گرفته می شود. معمولاً ترانسه توخالی، به

$$\begin{aligned} \mu u_{i,jj} + (\lambda + \alpha^2 M + \mu) u_{j,ji} + \alpha M w_{j,ji} \\ = \rho_b \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_i \\ \alpha M u_{j,ji} + M w_{j,ji} = \rho_f \ddot{u}_i + m \ddot{w}_i + \frac{\rho_f g}{k_D} \dot{w}_i \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه بالا μ و λ ثابت‌های لامه هستند که به صورت $\mu = \frac{Ev}{2(1+\nu)}$ و $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ تعریف می‌شوند (ν نسبت پواسون است). علاوه بر آن، $\alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$ و $M = \left(\frac{n}{K_f} + \frac{\alpha - n}{K_s} \right)^{-1}$ عبارتند از پارامترهای بیو به طوری که K_s ، K_f و n به ترتیب مدول بالک مخلوط جامد و مایع، مدول بالک اسکلت جامد، مدول بالک سیال و تخلخل خاک هستند. پارامتر وزن مخصوص در طرف راست معادله اول ρ_b و ρ_f به ترتیب وزن مخصوص کل مخلوط خاک و وزن مخصوص سیال درون خاک هستند. دو پارامتر k_D و m عبارتند از ضریب نفوذ پذیری دارسی و وزن موثر دانه‌های خاک که به صورت $m = \tau \rho_f / n$ تعریف شده و τ ضریب پیچش است. معادلات ارائه شده در رابطه (۱) بیانگر معادلات تعادل دینامیکی برای یک المان جامد-سیال از خاک اشباع هستند که بر حسب بردارهای تغییر مکان فاز جامد (u) و اختلاف حرکت بین فاز سیال و جامد (w) نوشته شده‌اند. لازم به ذکر است که این رابطه بر اساس فرضیه بیو در فرکانس‌های کم [29] استوار است که در آن طول موج منتشر شده در خاک به طور قابل توجهی بزرگتر از اندازه منافذ خاک است. منظور از کوچک بودن فرکانس موج این است که این فرکانس از یک حد مشخص که در آن روابط (۱) ارائه شده اند کمتر است. این فرکانس بر اساس پژوهش‌های بیو [29] با توجه به اندازه دانه‌ها و ویسکوزیته سیال محاسبه می‌شود. بنابراین اگر طول موج منتشر شده در خاک بزرگتر از اندازه منافذ خاک باشد، دلیل بر کم بودن فرکانس نیست.

۲. درستی آزمایی

در این پژوهش برای مدل‌سازی اجزاء محدود مسئله، از نرم‌افزار کامسول ۵،۴ [36] استفاده شده است. برای اطمینان از

دلیل تفاوت امپدانس چشمگیر آن با خاک بهترین عملکرد را در بین موانع موج دارد. اما یکی از عیوب عمده آن، ناپایداری دراز مدت به ویژه در زمین‌های اشباع است. در سوی مقابل، مانع موج پر شده با بتن، از لحاظ پایداری دارای مشکل خاصی نیست اما عملکرد آن به خوبی ترانشه توخالی نیست.

تاکنون، در بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه موانع موج، تمرکز اصلی روی زمین‌های خشک و همگن بوده است [23,24]. علاوه بر آن در بیشتر پژوهش‌ها تعداد محدودی از پارامترهای دخیل در رفتار موانع موج بررسی شده‌اند. عمده این بررسی‌ها در قالب مطالعات پارامتریک بوده است. به منظور بسط و تکمیل مطالعات قبلی، در مقاله حاضر، اثر لایه‌های زمین و سطح آب زیرزمینی بر عملکرد موانع موج بررسی شده‌اند. همچنین، به جای مطالعه پارامتریک، از بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای هندسی و موقعیت موانع موج استفاده شده است. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در مسائل ژئوتکنیکی مانند یافتن موانع موج بتنی بهینه افزایش یافته است [25-28].

در این مقاله، برای در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای و انتشار امواج در محیط متخلخل اشباع، از فرمولاسیون پوروالاستودینامیک ارائه شده توسط بیو [29] و نرم‌افزار کامسول ۲ استفاده شده است. برای الگوریتم بهینه‌سازی از روش CMA-ES^۳ به دلیل برتری نسبی آن نسبت به روش‌های دیگر، استفاده شده است [30-34]. در ادامه مقاله، جزئیات مربوط به تئوری حاکم بر مسئله، مشخصات زمین، بارگذاری، جنس مانع موج و نتایج بهینه‌سازی به طور کامل شرح داده شده‌اند.

۱. معادلات حاکم بر مسئله

در این مقاله برای تحلیل انتشار امواج در محیط‌های متخلخل اشباع، از تئوری پوروالاستودینامیک بیو^۱ استفاده شده است. در این تئوری، معادله حرکت برای واحد حجم از یک خاک همگن و ایزوتروپیک متخلخل تحت بارگذاری با فرکانس کم را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [21,28,29,35]:

4. Biot's Poroelastodynamic Theory

1. Biot

2. COMSOL-Multiphysics

3. Covariance Matrix Adaptation- Evolutionary Strategy

باشند در ادبیات فنی وجود ندارد. ولی در مقاله حاضر با تکیه بر درستی نتایج انتشار امواج در محیط‌های اشباع، اختصاص خواص مصالح به موانع موج با استفاده از پارتیشن بندی و همچنین مطالعات دقیق همگرایی برای اندازه‌المان‌ها از درستی نتایج به دست آمده در محیط‌های اشباع حاوی موانع موج اطمینان حاصل شده است.

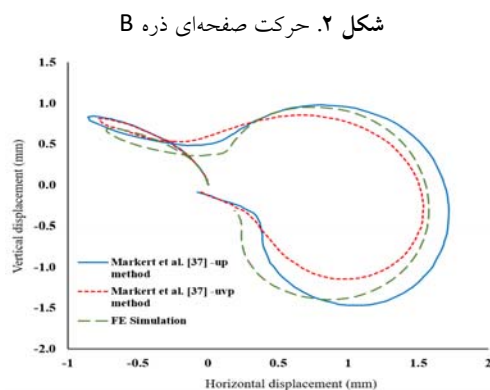


Fig. 2. In-plane particle motion at point B

همان‌گونه که در

شکل مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از نرم‌افزار کامسول همخوانی بسیار مناسبی با نتایج به دست آمده توسط مارکرت [37,38] دارد و می‌توان نتیجه گرفت که کامسول می‌تواند به خوبی انتشار موج در محیط متخلخل اشباع را مدل‌سازی کند.

۳. بهینه‌سازی

به دلیل تعدد متغیرهای انتخابی، استفاده از مطالعه پارامتری برای پیدا کردن مقدار بهینه متغیرهای موثر در ظرفیت کاهش امواج توسط مانع موج امکان‌پذیر نیست. از این رو در این پژوهش الگوریتم بهینه‌سازی CMA-ES استفاده شده است. الگوریتم CMA-ES، یک روش بهینه‌سازی بر اساس مفهوم هوش ازدحامی است. این الگوریتم در ابتدا جمعیتی را به صورت تصادفی ایجاد کرده و پس از حل دینامیکی هر جواب موجود در جمعیت توسط نرم‌افزار کامسول و تعیین میزان ARS (رابطه ۴)، آن‌ها را امتیازدهی کرده و در ادامه به صورت وزنی،

درستی مدل‌سازی اجزاء محدود دینامیکی در محیط متخلخل اشباع توسط نرم‌افزار کامسول و با استفاده از تئوری بیو، مسئله حل شده توسط مارکرت [37,38] که در شکل نشان داده شده است، برای درستی‌آزمایی مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، در این مسئله یک بار دینامیکی به معادله $F(t) = 10^5 \sin(25\pi t)$ (N) به عرض ۱ متر و به مدت ۰/۰۴ ثانیه به مدل اعمال می‌شود. هدف مسئله، ترسیم حرکت صفحه‌ای ذره در نقطه B به مختصات (۸،۸) است.

شکل ۱. شکل شماتیک مسئله درستی‌آزمایی

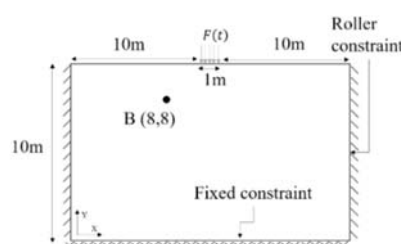


Fig. 1. Schematic of the verification problem

برای حل مسئله انتشار امواج در محیط دوفازه جامد-مایع با استفاده از روش اجزا محدود از ماژول پوروالاستیسیته^۲ و اعمال قانون داری در حالت آنالیز حوزه زمانی^۳ با المان‌های سرندپیته^۴؛ با ابعاد متغیر (المان‌های کوچک‌تر در اطراف محیط بارگذاری و المان‌های بزرگ‌تر دور از بارگذاری) استفاده شده است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی و نتایج گزارش در [37] شده توسط مارکرت

شکل مقایسه شده‌اند.

دلیل استفاده از مسئله حاضر برای درستی‌آزمایی این است که در ادبیات فنی، تعداد مراجعی که در آنها مسئله انتشار امواج در محیط‌های اشباع دو فازه در فضای زمان حل شده باشند، بسیار محدود است. در مراجع موجود، عمده مسائل حل شده مربوط به حالت‌های خاص و در بیشتر موارد در فضای فرکانس هستند. علاوه بر آن در برخی از مراجع مشخصات کامل مسئله برای شبیه‌سازی مجدد آن ذکر نشده‌اند. همچنین، مسئله‌ای که در آن وجود موانع نرم و سخت در محیط اشباع بررسی شده

4. Serendipity
5. Partition

1. Markert
2. Poroelasticity
3. Time domain

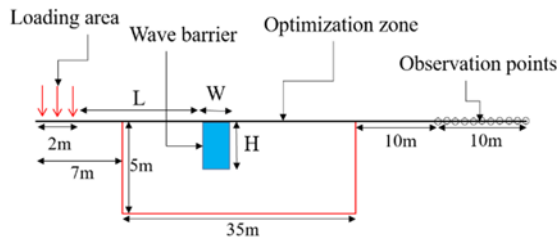


Fig. 4. Problem definition of the homogenous ground

در این مدل سازی برای جلوگیری از بازگشت موج به داخل محیط خاک، از مرزهای جاذب^۱ در اطراف مدل استفاده شده است. دلیل این امر آن است که محیط خاک در واقعیت دارای ابعادی نامتناهی است و برای شبیه سازی صحیح آن لازم است تا از بازگشت موج به داخل محیط جلوگیری شود. از لحاظ فیزیکی، با استفاده از مرزهای جاذب موج از انعکاس موج به داخل محیط جلوگیری می شود و موج به صورت دست نخورده تا بینهایت ادامه پیدا می کند. به طور کلی در فرمولاسیون مرزهای جاذب سعی می شود تا امپدانس المانهای جاذب با امپدانس محیط اطراف هماهنگ شود تا امواج فشاری و برشی منعکس نشوند. این امر به زبان ریاضی به صورت زیر بیان می شوند [40]:

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = -\rho c_p \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \right) \mathbf{n} - \rho c_s \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \mathbf{t} \right) \mathbf{t} \quad (2)$$

به شکلی که $\mathbf{n}$ و $\mathbf{t}$ به ترتیب بردارهای نرمال و مماسی در مرزهای مسئله (قبل از مرزهای جاذب) و c_p و c_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی در خاک هستند. هر چقدر موج های برخورد کننده به مرزهای جاذب قائم تر باشند، دقت این فرمولاسیون بیشتر خواهد بود.

بارگذاری سینوسی در عرضی به اندازه ۲ متر به مدل اعمال می شود. در مراجع مختلف مانند اتحادیه بین المللی راه آهن [41]، مارتین [42]، موریلو [43] و بارینچ [44] محدوده های مختلفی برای ارتعاشات ناشی از حرکت قطارها و ساخت و ساز ارائه شده اند. در مجموع با توجه به تنوع سرعت حرکت قطارها و بارگذاری های مربوط به ساخت و ساز میتوان محدوده فرکانسی را بین ۱ تا ۱۰۰ هرتز بیان نمود. با توجه به مرجع اتحادیه بین المللی راه آهن [41]، برای ریل های بدون

بین داده های برتر میانگین را پیدا می کند. میانگین بدست آمده، به عنوان میانگین توزیع جمعیت بعدی در نظر گرفته می شود و الگوریتم در ادامه بر اساس پراکندگی داده ها و همچنین تغییر فاصله میانگین جمعیت قبل و بعد، ماتریس کواریانس توزیع جمعیت نسل بعد را می سازد. سپس با داشتن مرکز و ماتریس کواریانس توزیع جمعیت نسل بعد، نسل بعد را تولید و دوباره برای تحلیل دینامیکی اجزا محدود به نرم افزار کامسول ارجاع می دهد. این عمل تا جایی تکرار می شود که تغییر مرکز نسل جدید نسبت به نسل قبلی کوچک باشد. در شکل فلوجارت و پارامترهای به کار گرفته شده در الگوریتم CMA-ES نشان داده شده است. در این فلوجارت، λ تعداد جمعیت هر نسل و μ تعداد متغیرهای مسئله است و سایر پارامترها با توجه به فرمولاسیون ارائه شده توسط هانسن [39] محاسبه می شوند. برای به دست آوردن اطلاعات کامل تر در مورد الگوریتم CMA-ES به مقاله هانسن [39] مراجعه شود.

شکل ۳. فلوجارت الگوریتم بهینه سازی CMA-ES

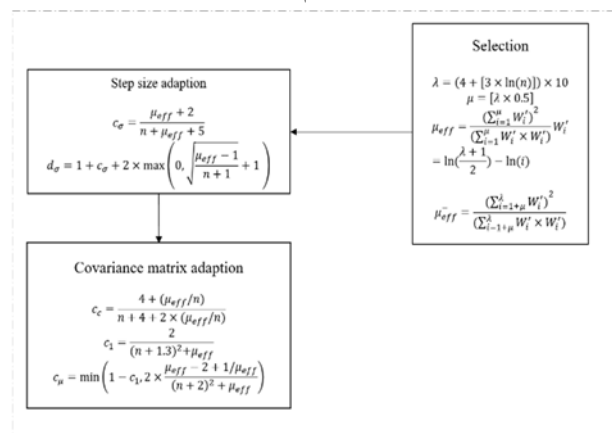


Fig. 3. CMA-ES flowchart

۴. تعریف مسئله

مسئله مورد بررسی در مقاله حاضر به صورت کلی و شماتیک در شکل نشان داده شده است. در این مقاله، با استفاده از الگوریتم CMA-ES، سعی بر یافتن بهترین موقعیت، طول و عرض مانع موج در محدوده نشان داده شده در شکل است.

شکل ۴. تعریف مسئله در خاک تک لایه همگن

1. Low reflecting boundaries

$$\overline{A_R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{Ri} \quad (3)$$

$$ARS = 20 \log(\overline{A_R}) \quad (4)$$

که در آن A_{Ri} عبارت است از ضریب کاهش دامنه و n برابر است با تعداد نقاط برداشت داده‌ها. دلیل استفاده از ضریب ۲۰ در معادله (۴) به تعریف دسیبل (dB) مربوط است. معمولاً در انتشار انواع مختلف امواج، توان (power) بیشتر از دامنه مورد توجه است و چون توان معمولاً با مجذور دامنه مرتبط است، به جای ۱۰ از عدد ۲۰ استفاده می‌شود. برای توضیحات بیشتر در این زمینه به منابع [45-47] مراجعه شود. در این پژوهش، تابع هدف که در الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد ARS است و هدف از بهینه‌سازی، پیدا کردن موقعیت و شکل مانع موجی است که قدرمطلق ARS را کمینه کند. لازم به ذکر است که بیشتر پژوهشگران [48-50] برای سنجش میزان آرامش یا عدم آرامش ساکنین اطراف محل منبع موج از پارامتر سرعت در جهت قائم ارتعاش استفاده کرده‌اند. به همین دلیل، در این مقاله از سرعت در جهت قائم برای سنجش ارتعاشات استفاده شده است.

۲-۵ مشخصات خاک و مانع موج

عملکرد موانع موج در دو نوع خاک همگن (جدول ۱) و لایه‌لایه (جدول ۲) مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات خاک همگن که مطابق مقاله هه و همکاران [51] انتخاب شده است. مشخصات خاک لایه‌لایه نیز با مبنا قرار دادن خاک همگن و افزایش سختی لایه‌های زیرین تعیین شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک همگن [51]

Parameter	Symbol	Units	
Biot-Willis parameter	α	N/A	1
Shear modulus of the solid part	G	MPa	25
Lame's parameter of the solid part	λ	MPa	58
Solid skeleton density	ρ_s	kg/m ³	1089
Fluid (water) density	ρ_f	kg/m ³	1000
Porosity	n	N/A	0.4
Hydraulic permeability	K	m/s	10 ⁻⁷
Shear wave velocity	V_s	m/s	151.15
Poisson's Ratio	ν	N/A	0.3

ناهمواری، فرکانس تولید شده برای قطارها با سرعت های ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب حدود ۳، ۵ و ۱۱ هرتز است. برای ریل‌های دارای ناهمواری، این مقادیر به بالای ۱۵ هرتز برای قطار با سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت افزایش می‌یابد. علاوه بر آن بارنیچ [44] محدوده فرکانسی بارگذاری‌های ناشی از حرکت ماشین‌ها، اتوبوس‌ها و قطارها را به ترتیب [3 to 30]، [9 to 27] و [10 to 40] هرتز اعلام کرده است. بنابراین با توجه به این مطالعات، فرکانس‌های بارگذاری سینوسی برابر با ۱۰ و ۲۰ هرتز انتخاب شده‌اند.

در فاصله ۵۰ متری از انتهای بارگذاری، ۱۰ نقطه مورد بررسی ۱ به طول ۱۰ متر (با فواصل مساوی ۱ متر)، در نظر گرفته شده‌اند. در این نقاط سرعت بیشینه ایجاد شده در جهت قائم ۲ با استفاده از تحلیل اجزاء محدود در محیط کامسول تعیین می‌شود و سعی بر آن است که با استفاده از مانع موج بهینه، سرعت بیشینه ایجاد شده در جهت قائم در این نقاط حداقل شود. شکل، مسئله در خاک همگن و شکل، شماتیک مسئله در خاک لایه‌لایه را نشان می‌دهند.

شکل ۵. تعریف مسئله در خاک لایه‌لایه

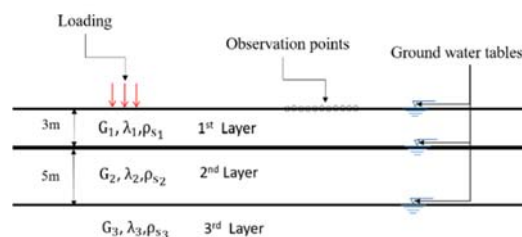


Fig. 5. Problem definition of the layered ground

۴،۱. ضریب کاهش دامنه

در این مقاله برای ارزیابی کارایی موانع موج، از طیف کاهش دامنه (ARS) استفاده شده است. این ضریب توسط پژوهشگران در گذشته [9,28] به عنوان معیار سنجش ارتعاش استفاده شده است. نسبت حداکثر سرعت در جهت قائم قبل و بعد از نصب مانع موج ضریب کاهش دامنه (A_R) نامیده می‌شود. برای یک دسته از نقاط روی زمین می‌توان از فرمول زیر برای محاسبه میانگین ضریب کاهش دامنه $\overline{A_R}$ و همچنین محاسبه طیف کاهش دامنه ARS استفاده کرد:

می‌گیرد. لازم به ذکر است که برای مطالعه تأثیر سطح آب زیرزمینی، در تمامی مراحل بهینه‌سازی برای در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و اجرایی با استفاده از روش پناستی، حداکثر حجم مانع موج به مقدار حداکثر ۵ متر مربع (می‌تواند کمتر از این مقدار هم باشد) محدود شده و در واقع بهینه‌سازی به صورت مقید^۳ انجام شده است. در ادامه، نتایج بهینه‌سازی به صورت مجزا برای خاک‌های همگن و لایه‌لایه ارائه شده‌اند.

۲-۶. نتایج بهینه‌سازی در زمین همگن

در این بخش، نتایج بهینه‌سازی موانع موج در زمین همگن در جدول و شکل و شکل) ارائه شده‌اند. مشخصات زمین در جدول آورده شده است. در جدول نتایج حاصل از بهینه‌سازی مسئله در شکل در بارگذاری ۱۰ و ۲۰ هرتز و در خاک خشک و اشباع و با موانع موج توخالی و بتنی ارائه شده است. در شکل نمودار تاریخچه زمانی سرعت در جهت قائم در فاصله ۵۰ متری از بارگذاری در حالت وجود و عدم وجود مانع موج آورده شده است. همچنین در

Table 1. Material properties of the homogenous soil

جدول ۲. مشخصات خاک لایه‌لایه [51]

Third layer	Second Layer	First layer	Units	Symbo	Parameter
1	1	1	N/A	α	Biot-Willis parameter
100	50	25	MPa	G	Shear modulus of the solid part
150	75	58	MPa	λ	Lame's parameter of the solid part
1700	1489	1089	kg/m ³	ρ_s	Solid skeleton density
1000	1000	1000	kg/m ³	ρ_f	Fluid (water) density
0.4	0.4	0.4	N/A	n	Porosity
10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	m/s	K	Hydraulic permeability
242.5	183.2	151.1	m/s	V_s	Shear wave velocity
0.3	0.3	0.3	N/A	ν	Poisson's Ratio

Table 2. Material properties of the layered soil

از آنجا که دامنه بارگذاری‌های وارد شده کوچک است، کرنش‌های ایجاد شده در زمین نیز کوچک و در محدوده رفتار ارتجاعی خاک است. مانع موج مورد استفاده از جنس بتن بوده و مشخصات آن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات مانع موج

ν	E (MPa)	ρ (kg/m ³)	Type of barrier
0.2	40000	2400	Concrete

Table 3. Material properties of the wave barrier

۵. نتیجه‌گیری و بحث

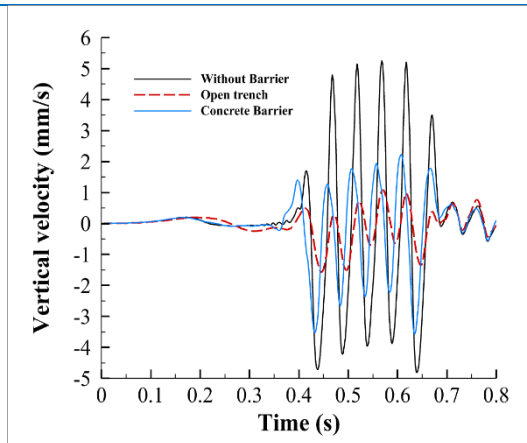
شکل (۷)، کانتور سرعت در جهت قائم در ۰/۳ ثانیه بعد از شروع بارگذاری در زمین تحت بارگذاری ۲۰ هرتز و ۰/۵ ثانیه بعد از شروع بارگذاری در زمین تحت بارگذاری ۱۰ هرتز با مانع موج و بدون مانع نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی در زمین همگن

ARS	Area (m ²)	H (m)	W (m)	L (m)	Type of barrier	Type of grounds	Frequency of loading (Hz)
-32.70	5.00	5.00	1.00	14.4	O*	Dry	10
-31.46	4.87	4.97	0.98	11.8	O	Saturated	
-6.63	5.00	۱.00	۰.00	21.8	C**	Dry	
-۸.63	5.00	1.00	5.00	17.1	C	Saturated	
-30.03	5.00	5.00	1.00	6.9	O	Dry	20
-25.66	3.40	5.00	0.68	16.1	O	Saturated	
-8.19	5.00	۰.00	۱.00	5.0	C	Dry	
-9.06	4.50	۰.00	۰.۹0	5.0	C	Saturated	

Open trench; **Concrete barrier

در این بخش، نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی موانع موج در شرایط مختلف برای مسائل تعریف شده در شکل و شکل) در قالب جداول و نمودارهای مختلف ارائه می‌شوند. بهینه‌سازی‌ها در زمین‌های خشک و اشباع همگن تحت اثر بارگذاری‌های هارمونیک با فرکانس‌های ۱۰ و ۲۰ هرتز صورت گرفته‌اند. علاوه بر آن، برای مشاهده تأثیر سطح آب زیرزمینی در زمین‌های لایه‌لایه، سطح آب در ترازهای مختلف در نظر گرفته شده است. بارگذاری در زمین‌های لایه‌لایه دارای فرکانس ۲۰ هرتز است. در تمام بهینه‌سازی‌ها، تابع هدف با استفاده از محاسبات اجزاء محدود در نرم‌افزار کامسول تعیین می‌شوند. این امر نیازمند الحاق^۱ نرم‌افزار کامسول به الگوریتم بهینه‌سازی است که بدون استفاده از رابط گرافیکی با کاربر (GUI) صورت



(IV)

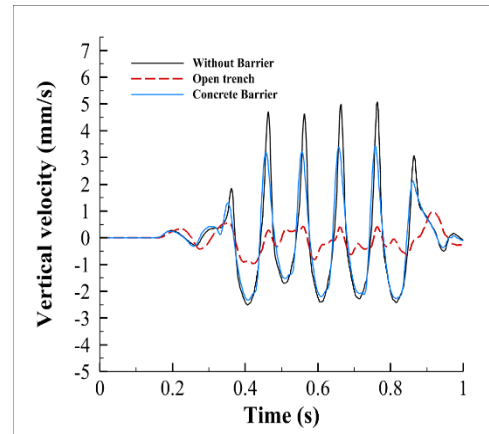
Fig. 6. Vertical velocity time history at the first observation point (I) in the dry ground under 10 Hz, (II) in the dry ground under 20 Hz, (III) in the saturated ground under 10 Hz, (IV) in the saturated ground under 20 Hz loading.

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول، مشاهده می‌شود که میزان کاهش لرزش توسط مانع موج ترانشه توخالی بسیار بیشتر از مانع موج بتنی است. به طوری که با استفاده مناسب و بهینه از یک ترانشه توخالی بهینه، می‌توان بیش از ۹۰٪ ارتعاشات را کاهش داد. دلیل این امر، وجود تفاوت امپدانس زیاد بین ترانشه توخالی و خاک است. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که با وجود اینکه موانع موج بتنی از نسبت امپدانس پایین‌تری نسبت به خاک برخوردار هستند، می‌توانند ارتعاشات را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. در پژوهش‌های قبلی به دلیل عدم استفاده از بهینه‌سازی معمولاً میزان کاهش ارتعاشات توسط موانع بتنی ناچیز بوده است (حدود ۱۵٪) [4,6,20,23]. اما در این تحقیق با استفاده از روش بهینه‌سازی CMA-ES، کاهش ارتعاشات با استفاده از موانع بتنی به مقدار ۶۵٪ افزایش یافته است.

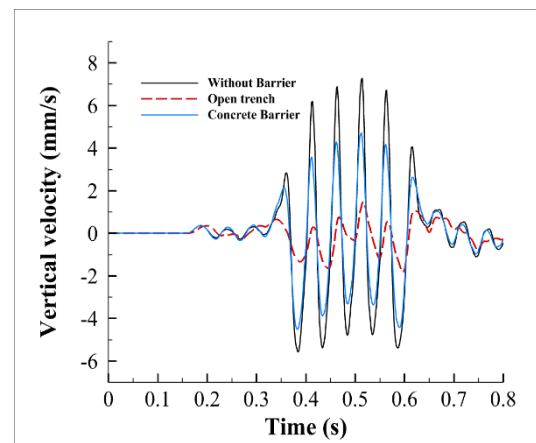
با توجه به شکل (۶) جسم بتنی تاثیر کمی بر فرکانس پاسخ دارد ولی این تاثیر با افزایش فرکانس بارگذاری بیشتر می‌شود. تغییر فرکانس پاسخ به دلیل خاصیت پراکندگی امواج سطحی در حین انتشار در دامنه مسئله به وجود می‌آید. اثر پراکندگی در بارگذاری‌های با فرکانس بیشتر مشهودتر است ولی در فرکانس‌های کمتر این اثر چندان تاثیرگذار نیست. همچنین وجود آب و انتشار امواج حجمی از طریق آب باعث تفاوت ماهیت بارگذاری و فرکانس می‌شود. به همین دلیل در شکل

Table 4. Optimization results in the homogenous ground

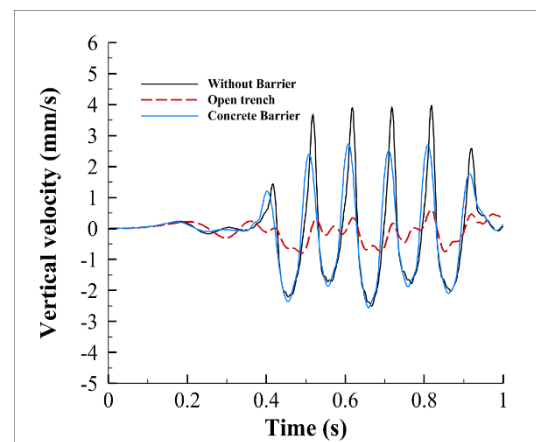
شکل ۶. نمودار تاریخچه زمانی سرعت قائم در اولین نقطه برداشت: (I) در زمین خشک همگن و بارگذاری ۱۰ هرتز، (II) در زمین خشک همگن و بارگذاری ۲۰ هرتز، (III) در زمین اشباع همگن و بارگذاری ۱۰ هرتز و (IV) در زمین اشباع همگن و بارگذاری ۲۰ هرتز



(I)



(II)



(III)

(۶- IV) که مربوط به زمین اشباع تحت اثر بارگذاری ۲۰ هرتز است، فرکانس پاسخ بیشتر تغییر کرده است، در حالی که در شکل (۶-I) که مربوط به خاک خشک تحت بارگذاری ۱۰ هرتز است، تغییرات فرکانس پاسخ ناچیز است. علاوه بر آن با توجه به

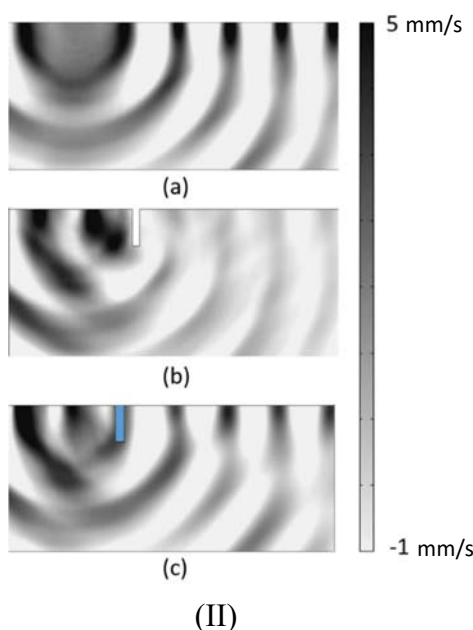
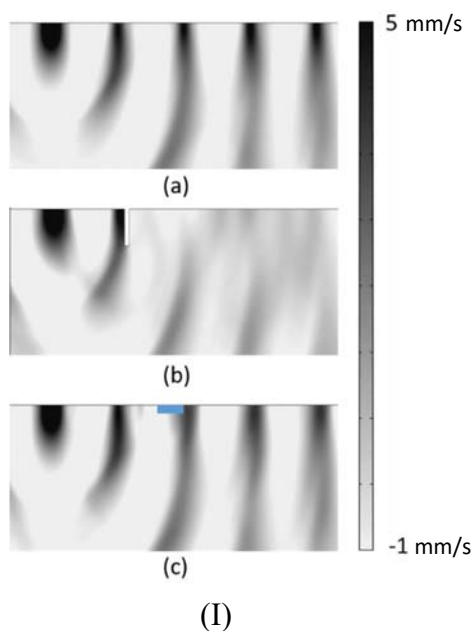
شکل (۷) و جدول می توان دریافت که با افزایش فرکانس، مانع موج بتنی تمایل دارد به صورت ستون عمودی قرار گیرد. در حالی که در فرکانس کوچکتر، مانع موج بتنی تمایل دارد به شکل دال مسطح باشد و این امر به دلیل کاهش طول موج در مقایسه با ارتفاع مانع مانع موج است.

نکته مهم دیگری که باتوجه به نمودارهای تاریخچه زمانی شکل (۶) می توان به آن اشاره کرد، این است که حداکثر لرزش ایجاد شده در زمین خشک (در شرایط یکسان) نسبت به زمین اشباع بیشتر است.

باتوجه به نتایج جدول می توان نتیجه گیری کرد که در شرایط خاص، مانع موج ممکن است از تمامی حجمی که می تواند اشغال کند، استفاده نکند و با حجم مصالح کمتر، تأثیر بیشتری داشته باشند. لازم به ذکر است که ابعاد بهینه موانع موج، مشابه ابعاد به دست آمده توسط اندرسون و نیلسون [4] است که در آن موانع موج برای کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطارها (با محتوای فرکانسی ۱۰ تا ۲۰ هرتز) دارای عرض ۱ متر و عمق ۶ متر هستند.

یکی از پارامترهای مهم دیگری که باید مدنظر قرار گیرد، فاصله مانع موج از محل بارگذاری است. باتوجه به نتایج جدول می توان دریافت که با افزایش فرکانس، مانع موج تمایل دارد که به منبع بارگذاری نزدیک تر شود. با افزایش فرکانس، طول موج کاهش یافته و مانع موج، موج را بیشتر از مسیر اصلی خود منحرف می کند. این امر با نزدیک شدن مانع به منبع بارگذاری تشدید یافته و در نتیجه عملکرد مانع بهبود می یابد.

شکل ۷. کانتور سرعت قائم (میلیمتر بر ثانیه): (I) در زمان ۰,۵ ثانیه بعد از شروع بارگذاری در زمین خشک همگن و بارگذاری ۱۰ هرتز، (II) در زمان ۰,۳ ثانیه بعد از شروع بارگذاری در زمین خشک همگن و بارگذاری ۲۰ هرتز، (III) در زمان ۰,۵ ثانیه بعد از شروع بارگذاری در زمین اشباع همگن و بارگذاری ۱۰ هرتز و (IV) در زمان ۰,۳ ثانیه بعد از شروع بارگذاری در زمین اشباع همگن و بارگذاری ۲۰ هرتز. (a) و (b) و (c) به ترتیب نشان دهنده کانتور سرعت در زمین بدون مانع، با مانع توخالی و مانع بتنی هستند.



ترازهای مختلف آب زیرزمینی ارائه شده‌اند. در جدول نتایج برای حالت‌های مختلف و در

شکل و ۹) نمودارهای تاریخچه زمانی سرعت قائم و کانتورهای سرعت قائم، به ترتیب نشان داده شده‌اند.

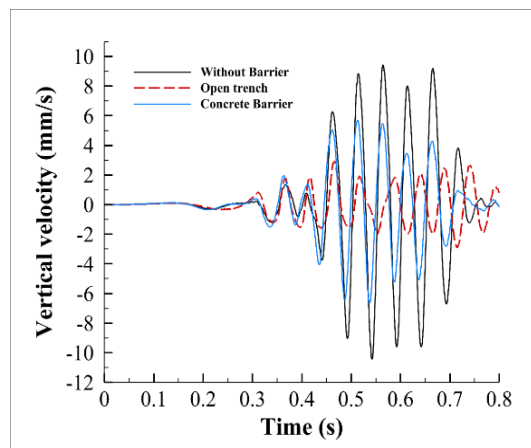
جدول ۵. نتایج بهینه‌سازی در زمین لایه‌لایه تحت بارگذاری ۲۰ هرتز

ARS	Area (m ²)	H (m)	W (m)	L (m)	Barrier	Ground water Table
-23.64	4.30	5.00	0.86	21.1	O*	۰
-12.69	5.00	4.35	1.15	5.0	C**	۰
-22.60	3.10	5.00	0.62	32.3	O	۲
-8.01	5.00	5.00	1.00	21.7	C	۲
-32.19	4.51	4.96	0.91	10.2	O	۸
-5.81	3.69	3.62	1.02	23.1	C	۸
-30.45	3.90	5.00	0.78	26.0	O	Infinite
-7.19	4.97	4.93	1.01	5.0	C	Infinite

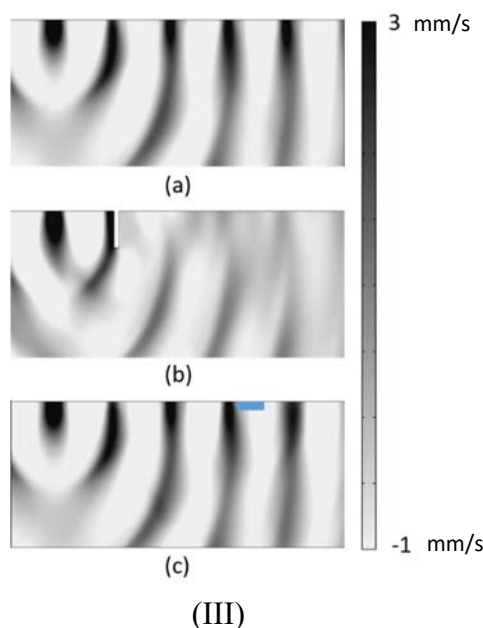
*Open-filled trench barrier, **Concrete barrier

Table 5. Optimization results for the layered ground

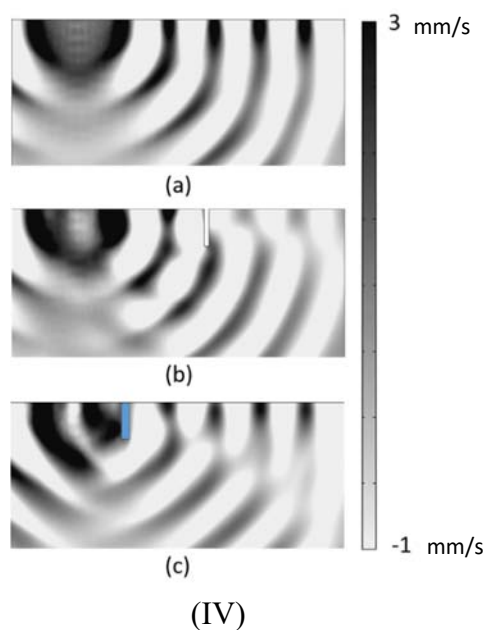
شکل ۸ نمودار تاریخچه زمانی سرعت قائم در اولین نقطه برداشت در زمین لایه‌لایه تحت بارگذاری ۲۰ هرتز با تراز سطح آب زیرزمینی: (I) صفر متر، (II) ۳ متر، (III) ۸ متر (IV) بینهایت (زمین خشک)



(I)



(III)



(IV)

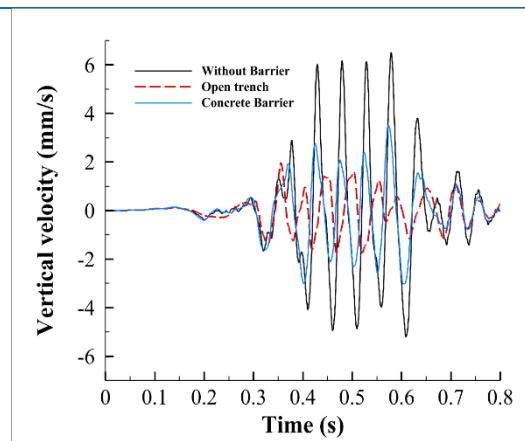
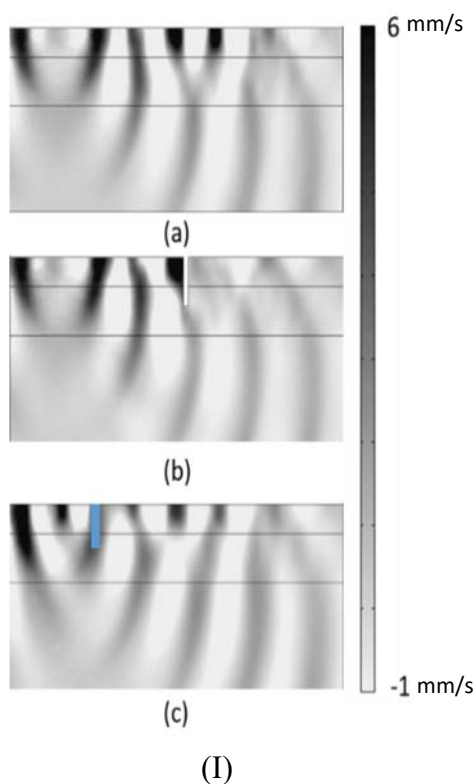
Fig. 7. Vertical velocity contour at (I) $t = 0.5s$ in the dry ground under 10 Hz loading (II) $t = 0.3s$ in the dry ground under 20 Hz loading (III) $t = 0.5s$ in the saturated ground under 10 Hz loading (IV) $t = 0.3s$ in the saturated ground under 20 Hz loading (a,b and c are ground without barrier, with open barrier and concrete barrier respectively)

۵.۱. نتیجه بهینه‌سازی در زمین لایه‌لایه

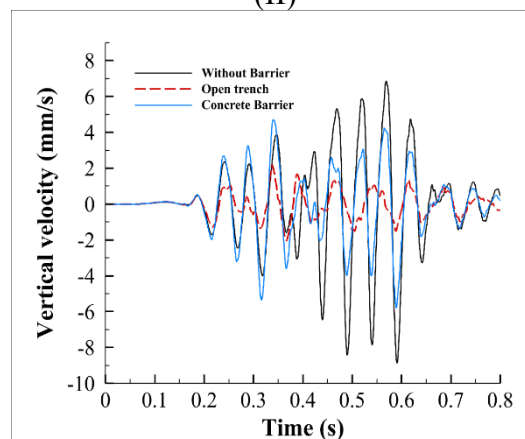
در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی موانع موج در زمین لایه‌لایه تحت اثر بارگذاری با فرکانس ۲۰ هرتز و در

بهینه از یک مانع موج توخالی بهینه می‌توان بیش از ۹۰٪ ارتعاشات را کاهش داد. همچنین با استفاده از موانع موج بتنی بهینه می‌توان (بسته به سطح آب زیرزمینی) میزان ارتعاشات را به میزان ۴۹٪ تا ۷۶٪ کاهش داد.

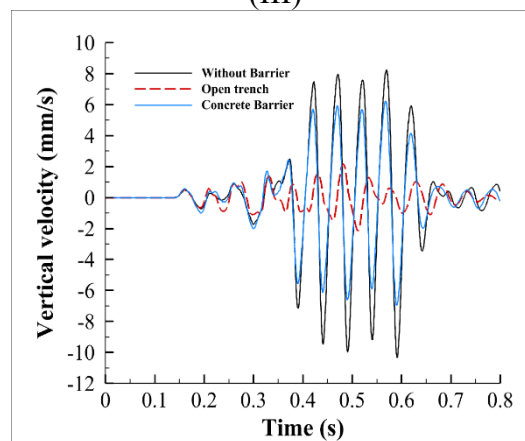
شکل ۹: کانتور سرعت در جهت قائم به میلیمتر بر ثانیه در زمان ۰٫۳ ثانیه بعد از شروع بارگذاری با فرکانس ۲۰ هرتز با تراز سطح آب زیرزمینی: (I) صفر متر، (II) ۳ متر، (III) ۸ متر (IV) بینهایت یا زمین خشک (a) و b و c به ترتیب نشان دهنده کانتور سرعت در زمین بدون مانع، با مانع توخالی و مانع بتنی هستند)



(II)



(III)



(IV)

Fig. 8. Vertical velocity time history at the first observation point in the layered ground under 20 Hz loading at (I) GWT=0m, (II) GWT=3m, (III) GWT=8m, (IV) GWT=infinity (dry ground)

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول و

شکل و ۹) مشاهده می‌شود که میزان کاهش ارتعاشات در ترانشه توخالی مانند نتایج ارائه شده در قسمت قبلی، بسیار بیشتر از مانع موج بتنی است، به طوری که با استفاده مناسب و

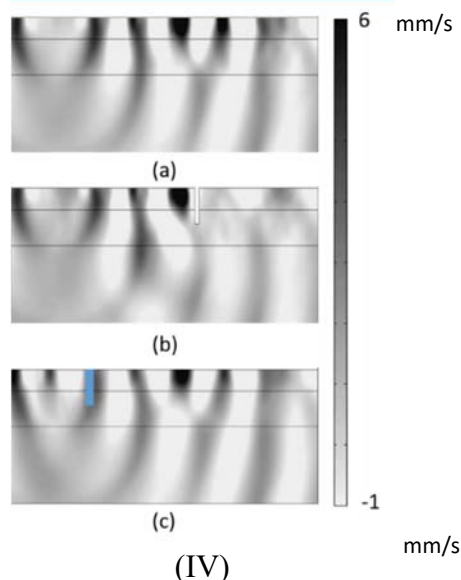
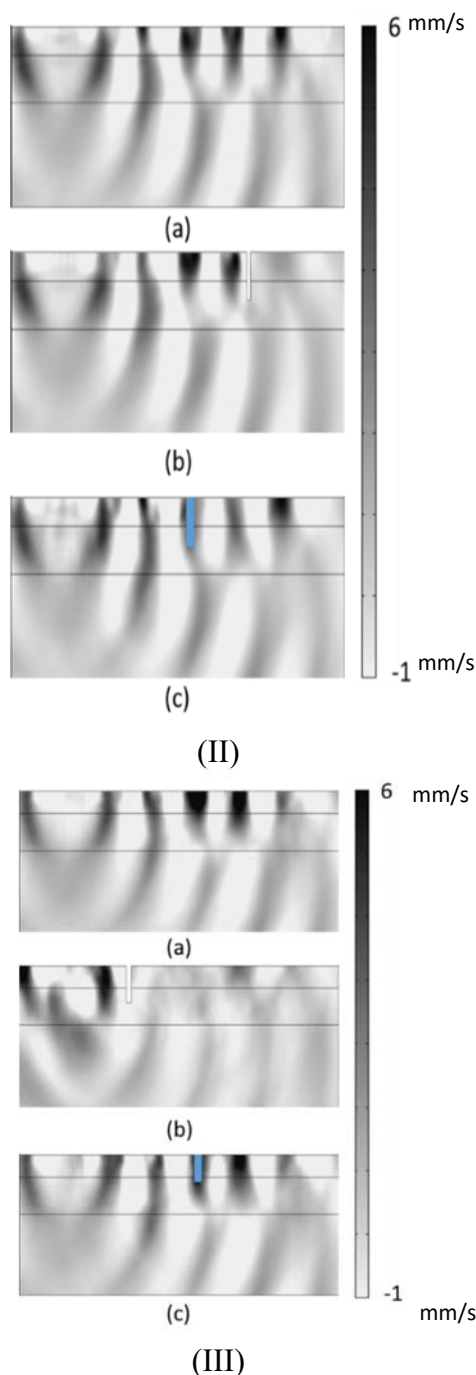


Fig. 9. Vertical velocity contour at $t = 0.3s$ in the layered ground under 20 Hz loading at (I) GWT=0m, (II) GWT=3m, (III) GWT=8m, (IV) GWT=infinity (dry ground) (a,b and c are ground without barrier, with open barrier and concrete barrier, respectively)

باتوجه به ابعاد و موقعیت موانع موج در جدول (۸ و ۹) می‌توان به این نتیجه رسید که مانع موج بتنی تمایل دارد به شکل ستونی باشد و مرز بین دولایه بالایی را قطع کند. دلیل این امر را می‌توان به گیر افتادن موج بین دو لایه بالا و پایین و مانع موج بتنی و در نتیجه پراکندگی بیشتر موج ربط داد. همچنین برخلاف نتایج ارائه شده در قسمت قبل، به دلیل این که انعکاس و حرکت موج در زمین لایه‌لایه با تراز سطح آب متفاوت دارای پیچیدگی بیشتری است، شکل حرکت موج، به سادگی مسئله مربوطه در خاک خشک نیست و موقعیت موانع موج در زمین لایه‌لایه از الگو خاصی پیروی نکرده و قابل پیش بینی نیست.

علاوه برآن، با توجه به نتایج جدول می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط خاص، ممکن است مانع موج تمام حجم مجاز را اشغال نکند و در برخی موارد با حجم اشغالی کمتر، نتیجه بهتری ارائه دهد. همچنین از در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی موانع موج در زمین لایه‌لایه تحت اثر بارگذاری با فرکانس ۲۰ هرتز و در ترازهای مختلف آب زیرزمینی ارائه شده‌اند. در جدول نتایج برای حالت‌های مختلف و در



(III)

۷. مراجع

- [1] Woods RD. Screening of surface waves in soils. 1968.
- [2] Segol G, Abel JF, Lee PCY. Amplitude reduction of surface waves by trenches. J Eng Mech Div 1978;104:621-41.
- [3] May TW, Bolt BA. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion. Earthq Eng Struct Dyn 1982;10:195-210.
- [4] Andersen L, Nielsen SRK. Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track. Soil Dyn Earthq Eng 2005;25:701-16.
- [5] Alzawi A, El Naggar MH. Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers. Soil Dyn Earthq Eng 2011;31:306-17.
- [6] Çelebi E, Fırat S, Beyhan G, Çankaya İ, Vural İ, Kırtel O. Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. Soil Dyn Earthq Eng 2009;29:824-33.
- [7] Cai Y, Ding G, Xu C, Wang J. Vertical amplitude reduction of Rayleigh waves by a row of piles in a poroelastic half-space. Int J Numer Anal Methods Geomech 2009;33:1799-821.
- [8] Kattis SE, Polyzos D, Beskos DE. Modelling of pile wave barriers by effective trenches and their screening effectiveness. Soil Dyn Earthq Eng 1999;18:1-10.
- [9] Pu X, Shi Z. Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils. Constr Build Mater 2018;180:177-87.
- [10] Liu X, Shi Z, Mo YL. Comparison of 2D and 3D models for numerical simulation of vibration reduction by periodic pile barriers. Soil Dyn Earthq Eng 2015;79:104-7.
- [11] Beskos DE, Dasgupta B, Vardoulakis IG. Vibration isolation using open or filled trenches. Comput Mech 1986;1:43-63.
- [12] Coulier P, Cuéllar V, Degrande G, Lombaert G. Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil. Soil Dyn Earthq Eng 2015;77:238-53.
- [13] Dijkmans A, Ekblad A, Smekal A, Degrande G, Lombaert G. Efficacy of a sheet pile wall as a wave barrier for railway induced ground vibration. Soil Dyn Earthq Eng 2016;84:55-69.
- [14] With C, Bahrekazemi M, Bodare A. Wave barrier of lime-cement columns against train-

شکل و ۹) نمودارهای تاریخیچه زمانی سرعت قائم و کانتورهای سرعت قائم، به ترتیب نشان داده شده‌اند. جدول و

شکل می‌توان دریافت که تراز سطح آب تأثیر بسزایی در موقعیت و شکل و عملکرد مانع موج می‌گذارد.

۶. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بهینه‌سازی موانع موج توخالی (به‌عنوان مانع نرم) و بتنی (به‌عنوان مانع سخت) پرداخته شده است. برای در نظر گرفتن شرایط واقعی، زمین به صورت همگن و لایه‌لایه و با سطح آب زیرزمینی متغیر مدل‌سازی شده است. به منظور محاسبه ارتعاشات در محیط متخلخل اشباع از تئوری پورو الاستودینامیک بیو و روش اجزا محدود استفاده شده است. باتوجه به پیچیدگی مسئله و ماهیت غیرخطی آن و فضای جواب بسیار بزرگ، از روش بهینه‌سازی CMA-ES مقید برای تعیین موقعیت و هندسه موانع موج استفاده شده است. تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از روش اجزا محدود و گنجاندن آن به صورت کوپله در مراحل بهینه‌سازی استفاده شده است. باتوجه به محاسبات انجام شده، نتایج زیر حاصل شده‌اند:

- موانع موج توخالی به علت تفاوت قابل توجه امیداندس آن با خاک، پتانسیل بسیار زیادی در کاهش ارتعاشات دارند.
- شکل موانع موج بهینه در خاک‌های همگن و لایه‌لایه متفاوت هستند. علاوه بر آن، خشک و اشباع بودن خاک و تراز آب زیرزمینی در میزان عملکرد موانع موج تأثیر دارند.

- در خاک‌های همگن، در برخی موارد، موانع موج بهینه بتنی به صورت دال بتنی افقی قرار می‌گیرند.
- در خاک‌های لایه‌لایه موانع موج به صورت قائم و ستونی قرار گرفته و دولایه اول را قطع می‌کنند.
- در برخی موارد، موانع موج تمام حجم مجاز را اشغال نمی‌کنند و می‌توان نتیجه گرفت که افزایش حجم ترانشه‌ها و بتن‌ریزی لزوماً باعث بهبود عملکرد موانع موج نمی‌شود.

- Earthq Eng 2020;24:84–108.
- [27] Sadeghi S, Abedini F, Rafiee-Dehkharghani R, Laknejadi K. Covariance matrix adaptation evolution strategy for topology optimization of foundations under static and dynamic loadings. *Comput Geotech* 2021;140:104461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104461>.
- [28] Moghadam AE, Rafiee-Dehkharghani R. Optimal design of wave barriers in dry and saturated poroelastic grounds using Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy. *Comput Geotech* 2021;133:104015.
- [29] Biot MA. Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. Low frequency range. *J Acoust Soc Am* 1956;28:168–78.
- [30] Hansen N. Benchmarking a BI-population CMA-ES on the BBOB-2009 function testbed. *Proc. 11th Annu. Conf. Companion Genet. Evol. Comput. Conf. Late Break. Pap.*, 2009, p. 2389–96.
- [31] Hansen N, Auger A, Ros R, Finck S, Pošik P. Comparing results of 31 algorithms from the black-box optimization benchmarking BBOB-2009. *Proc. 12th Annu. Conf. companion Genet. Evol. Comput.*, 2010, p. 1689–96.
- [32] Kern S, Müller SD, Hansen N, Büche D, Ocenasek J, Koumoutsakos P. Learning probability distributions in continuous evolutionary algorithms—a comparative review. *Nat Comput* 2004;3:77–112.
- [33] Socha K, Dorigo M. Ant colony optimization for continuous domains. *Eur J Oper Res* 2008;185:1155–73.
- [34] Hansen N. The CMA evolution strategy: a comparing review. *Towar. a new Evol. Comput.*, Springer; 2006, p. 75–102.
- [35] Bian X, Hu J, Thompson D, Powrie W. Pore pressure generation in a poro-elastic soil under moving train loads. *Soil Dyn Earthq Eng* 2019;125:105711.
- [36] <https://www.comsol.com> n.d.
- [37] Markert B, Heider Y, Ehlers W. Comparison of monolithic and splitting solution schemes for dynamic porous media problems. *Int J Numer Methods Eng* 2010;82:1341–83.
- [38] Heider Y. Saturated porous media dynamics with application to earthquake engineering 2012.
- [39] Hansen N. The CMA evolution strategy: A tutorial. *ArXiv Prepr ArXiv160400772* 2016.
- [40] No Title n.d. <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol>.
- induced ground-borne vibrations. *Soil Dyn Earthq Eng* 2009;29:1027–33.
- [15] Ekanayake SD, Liyanapathirana DS, Leo CJ. Attenuation of ground vibrations using in-filled wave barriers. *Soil Dyn Earthq Eng* 2014;67:290–300.
- [16] Çelebi E, Göktepe F. Non-linear 2-D FE analysis for the assessment of isolation performance of wave impeding barrier in reduction of railway-induced surface waves. *Constr Build Mater* 2012;36:1–13.
- [17] Saikia A, Das UK. Analysis and design of open trench barriers in screening steady-state surface vibrations. *Earthq Eng Eng Vib* 2014;13:545–54.
- [18] Dasgupta B, Beskos DE, Vardoulakis IG. Vibration isolation using open or filled trenches Part 2: 3-D homogeneous soil. *Comput Mech* 1990;6:129–42.
- [19] Cai Y-Q, Ding G-Y, Xu C-J. Amplitude reduction of elastic waves by a row of piles in poroelastic soil. *Comput Geotech* 2009;36:463–73.
- [20] Lu J-F, Xu B, Wang J-H. Numerical analysis of isolation of the vibration due to moving loads using pile rows. *J Sound Vib* 2009;319:940–62.
- [21] Pu X, Shi Z. Periodic pile barriers for Rayleigh wave isolation in a poroelastic half-space. *Soil Dyn Earthq Eng* 2019;121:75–86.
- [22] Wan Y, Yuanqiang C, Li S. Study of vibration-isolation efficiency of open trench in saturated ground by 2.5 D finite element method. *Rock Soil Mech* 2013;34:2111–8.
- [23] Yarmohammadi F, Rafiee-Dehkharghani R, Behnia C, Aref AJ. Design of wave barriers for mitigation of train-induced vibrations using a coupled genetic-algorithm/finite-element methodology. *Soil Dyn Earthq Eng* 2019;121:262–75.
- [24] Yarmohammadi F, Rafiee-Dehkharghani R. An optimal design procedure of wave barriers for mitigation of underground and above-ground railway vibrations. *Int J Struct Stab Dyn* 2020;20:2050121.
- [25] Rezaie A, Rafiee-Dehkharghani R, Dolatshahi KM, Mirghaderi SR. Soil-buried wave barriers for vibration control of structures subjected to vertically incident shear waves. *Soil Dyn Earthq Eng* 2018;109:312–23.
- [26] Dolatshahi KM, Rezaie A, Rafiee-Dehkharghani R. Topology optimization of wave barriers for mitigation of vertical component of seismic ground motions. *J*

- convert-magnitude-into-db-instead-of-10-log.
[47] No Title n.d.
https://murray.cds.caltech.edu/index.php/Why_is_dB_defined_as_20log_10%3F.
[48] Dynamic Compaction for Highway Construction. Volume I: Design and Construction Guidelines. Report FHWA/RD-86/133. FHWA, Washington, DC. 1986.
[49] Han J. Principles and practice of ground improvement. John Wiley & Sons; 2015.
[50] Garg N, Sharma O. Investigations on transportation induced ground vibrations. Proc. 20th Int. Congr. Acoust. ICA, 2010, p. 23–7.
[51] He C, Zhou S, Di H, Zhang X. The Influence of Variation in Groundwater Table on Ground Vibrations from Underground Tunnels. Adv. Transp. Geotech. IV, Springer; 2022, p. 75–88.
help.sme/sme_ug_theory.06.57.html.
[41] De Vos P. Railway induced vibration: state of the art report. Paris UIC Int Union Railw 2017.
[42] Martin E. Cobern MEW. Drilling Vibration Monitoring and Control System. n.d.
[43] Murillo C, Thorel L, Caicedo B. Ground vibration isolation with geofoam barriers: Centrifuge modeling. Geotext Geomembranes 2009;27:423–34.
[44] Barneich JA. Vibration Problems in Geotechnical Engineering-Vehicle Induced Ground Motion. Proc. a Symp. Spons. by Geotech. Eng. Div. Conjunction with ASCE Conv. Detroit, 1985, p. 187–202.
[45] No Title n.d.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Decibel>.
[46] No Title n.d.
<https://physics.stackexchange.com/questions/274052/why-we-have-used-20-log-to->

Using wave barriers for vibration mitigation in dry and saturated homogenous and layered grounds with variable groundwater level table

Alireza Esmaeili-Moghadam¹ ، Reza Rafiee-Dehkharghani^{2,*}

1- MSc Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran,

Abstract

This paper investigates mitigating vibrations in grounds subjected to dynamic loads using soft and hard wave barriers. In order to consider the real problems, layered grounds are also modeled in addition to homogenous grounds. An important factor that needs to be considered in the ground vibration analysis is the effect of the groundwater table. Within this context, different levels of groundwater levels are considered. Due to the difference between the impedance values at the interface of the dry and saturated parts of the ground, the upcoming incident waves experience a refraction phenomenon, in which part of the wave reflects back to the medium from which it is propagated, while the other part transmits to the medium on which it impinges on. The amplitude of the applied loadings is small, so the assumption of linear material behavior holds on. Biot's poroelastodynamic theory and advanced finite element models are used to simulate the wave propagation phenomenon in saturated soil. Soft wave barriers are considered open trenches, while hard barriers are filled with concrete. Considering the very large number of solution space for finding the position and geometry of the soft and hard barriers, CMA-ES optimization algorithm is used. To find the optimization function, the poroelastodynamic finite element model is coupled to the optimization algorithm. This is performed using developed robust scripts by which the whole finite element model, including the geometry, loading, boundary conditions, and assigning poroelastodynamic constitutive relation parameters, are defined, at each step of optimization, without implementing a graphic user interface (GUI). The soil domain is considered as homogeneous and layered unbounded half spaces. Low reflecting boundary conditions are applied around the model to model the unbounded soil medium in finite element simulations. One of the important parameters that affect the wave barriers' properties is the loading frequency. This is related to the dimension of the

wavelength generated by the dynamic loading at a specific frequency. To consider this effect, the optimizations are performed for dynamic loadings with two different frequency values of 10 and 20 Hz. The obtained results indicate that open trenches are more effective than concrete barriers. This is attributed to the huge impedance mismatch between the soil and air. The shape of optimal barriers is different in homogeneous and layered grounds, and the water level table significantly affects the optimal barriers' shape. In addition, in the homogenous ground, optimal trenches sometimes take a slab-like geometry, while in the layered ground, these barriers have a vertical column geometry and intersect the boundary between the two upper soil layers. All optimizations are performed by assigning a constraint for the maximum allowable volume to the barrier. This is performed by defining an appropriate penalty function. It is found that optimal barriers do not necessarily occupy the whole allowable barrier volume, and in some cases, their volume is less than the defined maximum constraint. This observation indicates that there is always no need to make the barriers as large as possible, which helps save construction material and reduce the amount of earthwork.

Keywords: Wave barriers; vibration; layered ground; saturated soil; optimization; finite element method.