

بررسی عملکرد ترانسه بهسازی شده با سبکدانه لیکا در کاهش ارتعاشات سطح زمین

محسن نقی زاده رکنی^۱، امید توسلی^{۲*}، رضا اسمعیل آبادی^۱، امیرپویا صراف^۱

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(نویسنده مسئول، Email: omid.tavasoli@iau.ac.ir)

چکیده

ارتعاشات محیطی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر آلودگی صوتی و سلامت ساکنان ساختمان‌های مجاور منابع ارتعاش ایجاد کنند. از این رو، مطالعات انجام شده در دو دهه اخیر بر روی کاهش ارتعاشات توجه زیادی از سوی محققان را به خود جلب کرده‌اند. در این مطالعه، به بررسی تأثیر انواع مختلف ترانسه بهسازی شده با سبکدانه لیکا شامل ترانسه‌های تک دیواره و دو دیواره در دو حالت فعال و غیرفعال، با استفاده از تلفیق نرم‌افزار المان محدود پلکسیس و زبان برنامه‌نویسی پایتون پرداخته شده و مدل‌ها با نتایج سایر تحقیقات، اعتبارسنجی گردیده و همچنین، مطالعه پارامتریک نیز برای ارزیابی اثر عوامل هندسی شامل عمق، عرض و طول برای هر دو سیستم انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که برای دستیابی به مقدار قابل قبولی از کارایی ترانسه، عمق 0.8λ و 1λ به ترتیب به عنوان عمق بهینه برای سیستم‌های تک و دیواره کافی است و با در نظر گرفتن اثر عرض ترانسه پر شده با لیکا، عرضی معادل 0.2λ و 0.15λ برای رسیدن به عرض بهینه به ترتیب برای سیستم‌های تک دیواره و دو دیواره کفایت می‌نماید. همچنین برای طراحی غیرفعال می‌توان نقش عمق را برای موانع تک جداره و دو جداره نادیده گرفت، زیرا عرض ترانسه در مقایسه با عمق ترانسه نقش مهم تری دارد. اما برای دستیابی به یک سیستم تک جداره قابل قبول، باید عرض نرمال را تا حدود 0.2λ افزایش داد.

کلمات کلیدی: ترانسه بهسازی شده، سبکدانه لیکا، ارتعاش سطح زمین، بار هارمونیک، مدل‌سازی عددی.

۱- مقدمه

ارتعاشات مصنوعی ساخته دست بشر به وسیله منابع دینامیکی خارجی شامل ترافیک، انفجار، شالوده ماشین آلات و سایر فعالیت‌های ساختمانی در شهرهای بزرگ، همواره باعث ایجاد مشکلاتی برای ساکنین و سازه‌های مجاور می‌باشد. بیشتر انرژی ارتعاشی گسیل شده در نزدیکی سطح زمین به وسیله امواج رایلی پخش و منتشر می‌شود [۱]. بنابراین، اجرای یک ترانسه در مسیر ارتعاش راه حلی مناسب می‌باشد، زیرا این ترانسه منجر به پخش و کاهش ارتعاشات موج در زمین می‌گردد [۲]. این دیواره به وسیله حالت پیچیده‌ای از برهم نهی امواج شامل انعکاس، انکسار، انحنا و تداخل، امواج گسیل شده را قطع، تضعیف و پخش می‌کنند. تقلیل و تضعیف امواج در دو گروه کلی شامل طرح فعال که در آن ترانسه در نزدیکی منبع ارتعاش نصب شده است و طرح غیر فعال که در آن ترانسه دور از منبع ارتعاش ساخته شده است، طبقه بندی می‌شوند و از سوی دیگر، عملی بودن مانع موج در دو حالت ترانسه باز و پر نیز طبقه بندی می‌گردد [۳].

به منظور ارزیابی میزان موثر بودن ترانسه در میرا کردن امواج، مطالعات متعددی از جمله آزمایشهای میدانی و مدل‌سازی عددی انجام شده است [۴-۸]. وودز^۱ اولین کسی بود که به منظور ارزیابی میزان موثر بودن ترانسه‌های باز، یک آزمایش تمام مقیاس را انجام داده و پیشنهاد نمود، که در صورتی یک ترانسه در کاهش امواج واصله موثر است، که حداقل ۷۵ درصد امواج را دفع کند [۹]. با این وجود به علت مشکلات ساخت و پایداری، ترانسه‌های باز در بسیاری از موارد در زمان‌های طولانی کاربردی نمی‌باشند و در چنین مواردی معمولاً از ترانسه‌های پر استفاده

¹ Woods

می‌شود. همچنین جهت درک میزان موثر بودن ترانسه باز و پر شده با لیکا، مطالعات میدانی انجام شده نشان می‌دهند که، عملکرد ترانسه باز و پر شده با لیکا بترتیب ۶۸ و ۶۷ درصد می‌باشد. همچنین جهت ارزیابی موثر بودن ترانسه در کاهش امواج ورودی در محدوده فرکانس، چندین ردیف از موانع پر شده با ژئوفوم استفاده شده است و افزایش عمق ترانسه به بیش از یک طول موج، اثر قابل اغماضی روی عملکرد ترانسه در طرح غیرفعال دارد [۱۰-۱۲]. سلبی^۲ و همکاران به منظور محاسبه اثر کاهشی ترانسه باز پر شده با مصالح سخت و نرم در طرح‌های فعال و غیر فعال، آزمایشات میدانی متنوعی را انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که، ایزولاسیون فعال در مقایسه با ایزولاسیون غیرفعال موثرتر است و مصالح پرکننده نرم در مقایسه با مصالح سخت، در میرا کردن امواج ورودی موثرتر عمل می‌کنند [۱۳]. تاثیر عوامل هندسی ترانسه پر شده با لیکا در کاهش امواج وارده، در یک مطالعه پارامتریک با دستگاه سانتریفوژ انجام گردیده و نتایج مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد کاهشی امواج به عمق ترانسه وابسته است [۱۴]. بسکوز^۳ و همکاران به منظور تعیین قابلیت کاهشی ترانسه‌های باز و پر شده با بتن در خاک‌های همگن و لایه بندی شده، یک مدل عددی بر مبنای روش المان‌های مرزی را توسعه دادند [۱۵-۱۷]. احمد و الحسینی^۴ به تحلیل تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و مصالح بر روی اثر کاهشی ترانسه‌های مستطیلی باز و پر شده با بتن پرداختند و یک مدل ساده برای ایزولاسیون امواج در طرح‌های فعال و غیرفعال ارائه دادند [۱۸]. هاوپت^۵ برای بررسی عملکرد ایزولاسیون ارتعاشات از مدل‌سازی عددی استفاده نموده و پیشنهاد داد که به منظور دستیابی به میرایی مناسب، عمق ترانسه باید حداقل برابر با ۸۰ درصد طول موج $R(\lambda_T)$ باشد [۱۹، ۲۰]. برای تعیین میزان موثر بودن ترانسه‌های پر شده با آب و لیکا، مطالعات متعدد، نشان می‌دهند که عمق نسبت به طول و عرض ترانسه نقش مهم‌تری را در افزایش میزان اثرپذیری و عملکرد کاهشی آن ایفا می‌کند [۲۱-۲۷]. همچنین توسلی و همکاران در مقاله خود، با استفاده از آزمایشات میدانی و تحلیل عددی، ارتعاشات سطح زمین ناشی از شمع‌های استوانه‌ای، مخروطی و نیمه مخروطی را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه مطالعه نشان داد که استفاده از شمع‌هایی با بخش متغیر، کارایی فرآیند حفاری را افزایش، مصرف انرژی را کاهش و همچنین با کاهش زمان عملیات، آلودگی صوتی را کاهش می‌دهد [۳۲]. مطالعه و مرور ادبیات فنی نشان داد که یک مطالعه پارامتری جامع برای بررسی کارایی شکل‌های مختلف ترانسه پر شده با لیکا مورد نیاز است. هدف اصلی این مطالعه، بهینه سازی انواع مختلف از دیوارهای حائل شامل دیواره‌ی تک و دو گانه، براساس دستیابی به کارایی مطلوب که ۷۵٪ کاهش در میزان لرزش سطح زمین است، می‌باشد.

در این مقاله، روشی نوین برای خود کارسازی مطالعه پارامتریک با استفاده از ترکیب پلکسیس و پایتون اتخاذ شده است. این رویکرد با استفاده از اسکریپت‌های پایتون به منظور کاهش زمان و افزایش دقت در مدل‌سازی ارتعاشات زمینی توسعه یافته است. از طریق این اسکریپت‌ها، تنظیمات مختلف مدل‌های المان محدود با تغییرات پارامتری سریع و دقیق اعمال می‌شود. این امر امکان بررسی تأثیر گسترده‌ای از عوامل هندسی و فیزیکی بر کاهش ارتعاش را فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از این مطالعه خود کار، دقت بالایی در مقایسه با داده‌های موجود از مطالعات مشابه نشان می‌دهد خود کارسازی مدل‌سازی با استفاده از پلکسیس در این تحقیق به مزایای چشمگیری منجر شده است. این روش امکان اجرای سریع‌تر و دقیق‌تر مطالعات پارامتریک را فراهم می‌کند، به ویژه در پروژه‌هایی با محدوده وسیعی از شرایط متغیر. اتوماتیک‌سازی این امکان را می‌دهد که تأثیرات تغییرات پارامترها به صورت فوری و دقیق بررسی شوند، که این امر به بهینه‌سازی طراحی‌ها و انتخاب استراتژی‌های مؤثرتر کمک می‌کند. علاوه بر این، کاهش خطاهای انسانی و افزایش بازدهی کلی در پروسه مدل‌سازی، از دیگر فواید این رویکرد هستند. این تکنیک‌ها نه تنها زمان را کاهش می‌دهند، بلکه اطمینان بیشتری را در نتایج مدل‌سازی به ارمغان می‌آورند. یک مدل المان محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار پلکسیس توسعه داده شده و اعتبار مدل با نتایج مقاله منتشر شده مقایسه شده است. متعاقباً، شکل‌های مختلفی از جمله سیستم‌های تک دیواره و دو دیواره برای ارزیابی عملکرد غربالگری ارتعاش انتخاب شده‌اند. پارامترهای مختلف، از جمله عوامل هندسی و ابعادی که بر عملکرد کاهش ارتعاش حاکم هستند، در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، یک مدل کوپل از پلکسیس-پایتون برای خود کارسازی مطالعه پارامتریک توسعه داده

² Celebi

³ Beskos

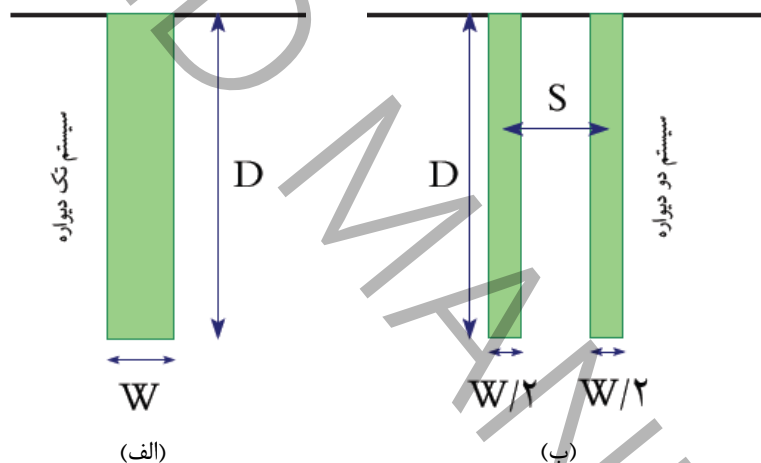
⁴ Ahmad and Al-Hussaini

⁵ Haupt

شده است. علاوه بر آزمایشات میدانی و آزمایشگاهی، روشهای عددی نظیر روش اجزا محدود و روش المانهای مرزی به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت بررسی و ارزیابی عملکرد کاهش موانع امواج قابل استفاده و کاربردی است.

۲- مدلسازی سه بعدی تاثیر ترانشه اصلاح شده با سبکدانه لیکا در ارتعاشات محیطی و اعتبارسنجی آن

روش مورد استفاده برای انجام مطالعات در این مقاله شامل تعریف مشخصات سیستم های مختلف ترانشه (ابعاد و هندسه)، مشخصات اجزاء محدود (خاک، پرکننده لیکا)، محاسبه میزان کارایی مدلسازی و صحت سنجی مدلسازی می باشد. انتخاب سبکدانه لیکا به دلیل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد آن از جمله نزدیک بودن جنس این سنگدانه به مصالح خاکی، وزن مخصوص سبک و مقاومت فشاری بالای آن صورت گرفته است. به منظور انجام مقایسه، برای تمامی سیستم ها یک مقطع با مساحت کلی یکسان در نظر گرفته شده و عمق های استفاده شده در مطالعه پارامتریک برای هر دو سیستم تک دیواره و دو دیواره با هم برابر می باشند. عرض هر دیوار در سیستم دو دیواره نصف عرض سیستم تک دیواره بوده و با توجه به شکل ۱، قسمت (الف) عرض بهینه برای سیستم تک دیواره برابر W و قسمت (ب) برای سیستم دو دیواره $W/2$ می باشد.



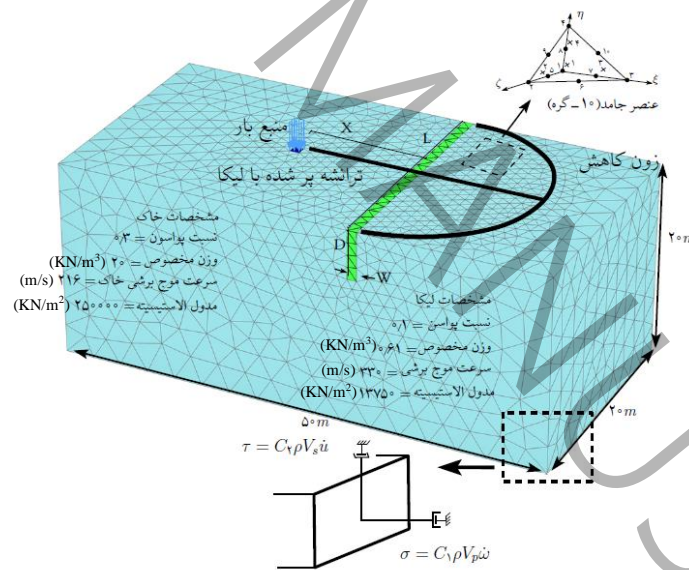
شکل ۱: سیستم های مختلف ترانشه، الف) سیستم تک دیواره ب) سیستم دو دیواره
Figure 1: Different trench systems, a) single wall system b) double wall system

در این قسمت، جهت مطالعه عملکرد ترانشه پر شده با لیکا، از روش عددی اجزاء محدود با مدلسازی و صحت سنجی در نرم افزار پلکسیس^۶ استفاده شد. برای این کار پس از تعریف هندسه، شکل مساله، تخصیص پارامترهای اولیه و مدل رفتاری مصالح، مقدار متوسط سرعت قائم ذرات خاک قبل و بعد از اجرای ترانشه تعیین و نتایج تحلیل ها استخراج گردید. از آنجایی که در جهت قائم، ذرات خاک بیشترین جابه جایی را نسبت به سایر جهات دارند، سرعت ذرات خاک در سطح زمین در جهت قائم برای بررسی در نظر گرفته شد. برای مدلسازی خاک، بعنوان یک نیم فضای همگن و ایزوتروپ و با توجه دامنه ارتعاشات کوچک و عدم داشتن تغییر شکل های پلاستیک، از مدل الاستیک خطی استفاده گردید [۱۱، ۲۱، ۲۷]. مدل عددی بطور قابل توجهی از امواج گسیل شده از مرزهای مدل تاثیر می پذیرد، لذا ابعاد هندسی باید به گونه ای انتخاب شوند که مرزهای مدل، به اندازه کافی دور از ناحیه مورد مطالعه قرار گیرد. فاصله مرزهای مدل باید به گونه ای انتخاب شوند که تأثیری بر روی

⁶ PLAXIS

نحوه انکسار موج در محیط و تداخل امواج در اطراف ترانسه نداشته باشد. ابعاد مدل در سیستم فعال، طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر با ۵۰، ۲۰ و ۲۰ متر در نظر گرفته شد. اما، در حالت غیر فعال برای جلوگیری از برگشت امواج منعکس شده به داخل مدل، طول مدل از ۵۰ متر به ۷۰ متر افزایش پیدا کرد. ابعاد بر اساس نیاز به کاهش تأثیرات امواج ارسالی و منعکس شده از مرزها انتخاب شده‌اند، تا اطمینان حاصل شود که نتایج تحلیل‌ها تا حد ممکن واقع‌بینانه و دقیق هستند. استفاده از فاصله‌ای معادل حداقل ده برابر λ از منبع ارتعاش، تضمین می‌کند که مدل تأثیرات امواج را به طور مؤثری در بر می‌گیرد و از ایجاد خطاهای ناشی از بازتاب‌های مرزی جلوگیری می‌کند [۲۷، ۳۲ و ۳۳]. این نرم‌افزار برای افزایش دقت مش بندی و دستیابی به نتایج قابل قبول، از پارامتری بر مبنای ابعاد مدل هندسی و تعداد المان‌ها موسوم به اندازه متوسط المان (I_e) معادل ۰/۵ جهت برآورده سازی معیار کولمیر و لیسمر^۷ استفاده می‌کند [۲۸]. بر مبنای این معیار اندازه متوسط المان‌ها باید کوچکتر از یک هشتم طول موج نظیر حداکثر فرکانس موج ورودی باشد. برای عبور بار دینامیکی ایجاد شده ناشی از پی ماشین آلات، منبع ارتعاش بصورت یک بارگذاری هارمونیک با دامنه واحد، فرکانس ۴۰ هرتز و بازه زمانی بارگذاری دینامیکی برابر با ۰/۵ ثانیه مدل‌سازی گردید [۳۱]. این انتخاب به منظور مدل‌سازی یک منبع ارتعاشی نسبتاً ساده و قابل کنترل بوده تا امکان مقایسه اثربخشی ترانسه‌ها در شرایط مختلف فراهم آید. علاوه بر این، ورق فولادی و وزن فوندانسیون به عنوان بخشی از سیستم مدل‌سازی شده‌اند تا از نظر دینامیکی شبیه‌سازی دقیق‌تری از شرایط واقعی فراهم شود، هرچند که تغییرات در وزن این اجزا تأثیر قابل توجهی بر نتایج نداشته است.

هندسه کامل مدل برای محاسبه کارایی ترانسه پر شده در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، مشخصات لیکا شامل: نسبت پواسون، وزن مخصوص، سرعت موج برشی، مدول الاستیسته و همچنین مشخصات خاک شامل: نسبت پواسون، وزن مخصوص، سرعت موج برشی، مدول الاستیسته در مدل‌سازی اعمال گردید.



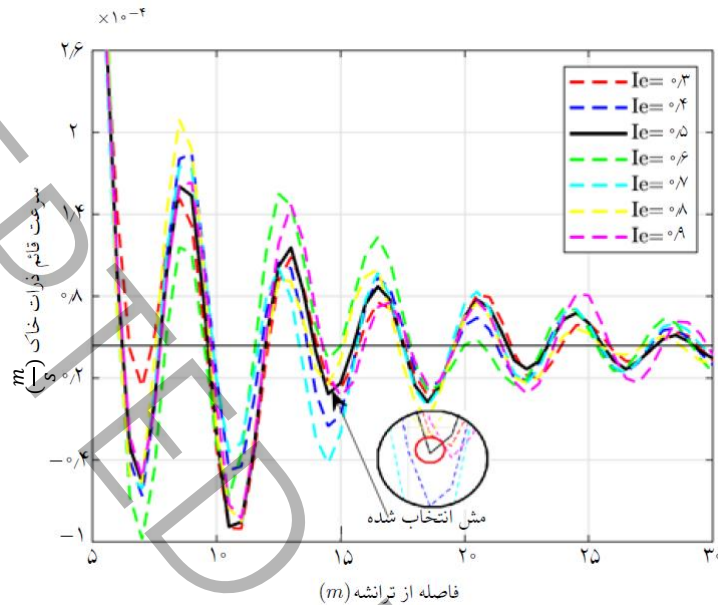
شکل ۲: هندسه مدل در این مطالعه

Figure 2: Geometry of the model in this study

محیط مدل با استفاده از المان‌های مثلثی ۱۵ گره ای با در نظر گرفتن اندازه المان‌ها به صورت ریز، مش بندی شد. تحلیل حساسیت برای مقایسه اندازه‌های المان‌ها و مش بندی برای یک ترانسه پر شده با لیکا در مکانی به فاصله ۵ متر از منبع بار و با طول، عمق و عرض به ترتیب ۵، ۱۰، ۵

⁷ Kuhlemeyer and Lysmer

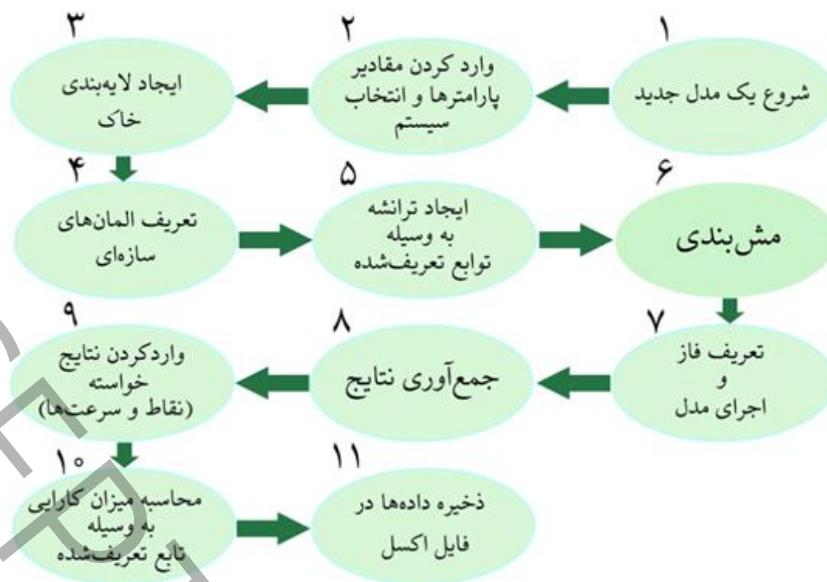
و ۰/۵ متر، در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که اندازه متوسط عنصر (I_e) برابر با ۰/۵ دارای متعادل‌ترین نتایج از نظر نمودار قله و دره برای رسیدن به نتایج مطلوب می‌باشد (شکل ۳). درجات آزادی تمامی گره‌های کف مدل، در سه جهت به صورت گیردار بوده و در مرزهای جانبی نیز، جهت جابجایی در راستای قائم به صورت تکیه‌گاه غلتکی عمل می‌نمایند. در نهایت این اندازه مش بندی برای انجام تحلیل‌ها انتخاب گردید.



شکل ۳: تحلیل حساسیت برای مقایسه اندازه مش‌ها

Figure 3: Sensitivity analysis for mesh size comparison

تغییر پارامترهای موثر بر ترانشه، شمار قابل توجهی سناریوی مدل‌سازی ایجاد می‌کند، که انجام آن فرآیندی بسیار زمانبر می‌باشد. در نتیجه، به منظور صرفه جویی در زمان محاسبات و همپوشانی این نرم افزار با زبان برنامه نویسی پایتون، برنامه ای تهیه گردید که به کاربر اجازه می‌دهد تا با استفاده از کنترل کننده زبان برنامه نویسی، هر دو پارامترهای خروجی و ورودی مدل را کنترل کند. مزیت اصلی این روش، تسریع در انجام مطالعه پارامتریک می‌باشد. ورودی برنامه کامپیوتری، مقادیر پارامترهای مختلف شامل: عمق ترانشه (D)، عرض ترانشه (W)، طول ترانشه (L)، فاصله بین دیواره ها (S) و موقعیت دیواره ها (X) می‌باشند. برنامه کامپیوتری با ۱۱ گام تعریف گردید که در ابتدا با ساخت یک مدل ترانشه ساخته شد (گام های ۱ تا ۶ در شکل ۴). سپس فازهای تحلیل، تعریف شد (گام ۷) و در نهایت، مدل اجرا گردیده و میزان کارایی ترانشه محاسبه شد (گام های ۸ تا ۱۱).



شکل ۴: فرایند پیاده سازی مدل عددی ترکیبی Plaxis با Python
Figure 4: Implementation process of Plaxis hybrid numerical model with Python

میزان کار آیی ترانشه، از فاکتور نسبت متوسط کاهش دامنه (\bar{A}_r) بدست می آید (رابطه ۱) [۱۱]. این فاکتور برابر با حاصل تقسیم مقدار متوسط سرعت قائم خاک بعد از نصب ترانشه بر قبل از آن می باشد. برای محاسبه میزان کارایی در حالت بدون ترانشه، میزان لرزش سطح زمین از منبع بار به فواصل ۰/۵ متر اندازه گیری می شود. دلیل انتخاب این فاصله، ارائه دقیق ترین پاسخ سطح زمین قبل و بعد از نصب ترانشه است. در مرحله بعدی، بعد از ایجاد ترانشه در مقابل منبع بار، باز هم میزان جابجایی سطح زمین در نقاط بعد از ترانشه با فواصل ۰/۵ متر اندازه گیری می شود و بر مقادیر لرزش سطح زمین قبل از ایجاد ترانشه در همان نقاط اندازه گیری شده تقسیم می شود. مقدار فاصله بعد از ترانشه برای اندازه گیری ارتعاش روی سطح زمین در قسمت ۱-۱-۳ و ۱-۲-۳ توضیح داده شده است. در نهایت، برای ارائه مقدار کارایی ترانشه به صورت درصد، از تمام مقادیر میانگین گرفته و در ۱۰۰ ضرب می شود (رابطه ۲) [۲۳].

$$A_r = \sum \frac{(V_r)_{After}}{(V_r)_{Before}} \quad (1)$$

$$\bar{A}_r = (1 - A_r) \times 100 \quad (2)$$

یکی از مهمترین مراحل مطالعه پارامتریک، اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده می باشد. برای این منظور، مدل توسعه یافته در این مقاله، با استفاده از یک مدل عددی، برای یک ترانشه باز شرایط سیستم فعال و غیرفعال اعتبارسنجی می شود. برای این هدف، نتایج مقالات کاتیس^۸ و همکاران و الحسینی^۹ برای حالت های فعال و غیرفعال انتخاب و خصوصیات خاک و منبع ارتعاش برای هر دو سیستم در جدول ۱ ارائه شده است [۳۰ و ۳].

⁸ Kattis

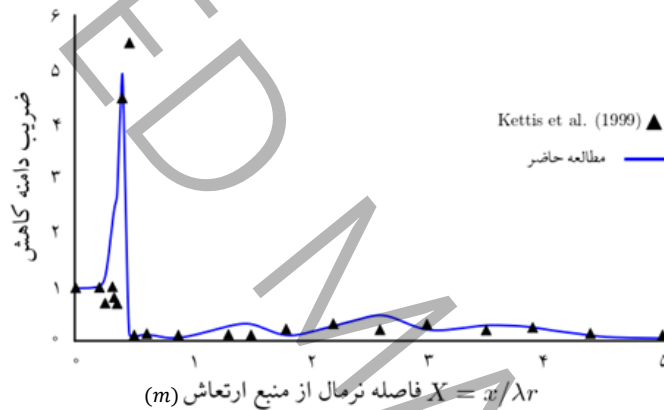
⁹ Ahmad and Al-Hussaini

جدول ۱: خواص سیستم فعال و غیر فعال خاک برای اعتبارسنجی [۳۰, ۳]

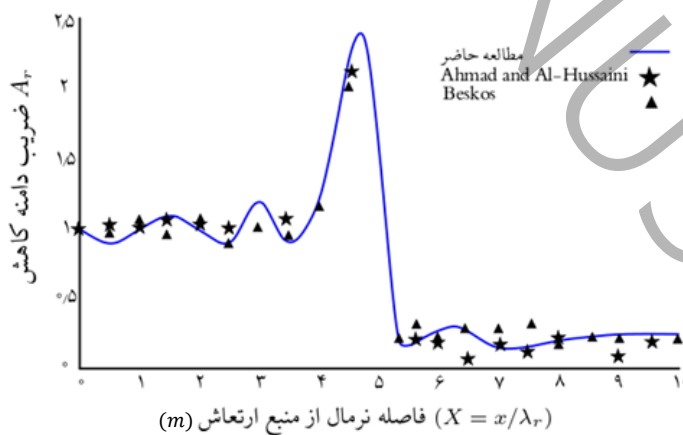
Table 1: Properties of active and passive soil system for validation [3 & 30]

مشخصات بار		مشخصات خاک					
فرکانس ارتعاش (Hz)	بزرگای بار (kN)	طول موج رایلی (m)	میرایی رایلی	چگالی (kN/m ³)	سرعت امواج رایلی (m/s)	نسبت پواسون	سرعت موج برشی (m/s)
۱	۵	۵	۱۷/۵	۲۵۳	۰/۲۵	۲۷۵	فعال
۱	۳	۵	۱۸	۹۳	۰/۲۵	۱۰۱	غیر فعال

شکل های ۵ و ۶ نتایج مقایسه مدل توسعه یافته مطالعه حاضر با نتایج منتشر شده [۳۰ و ۳] را به ترتیب برای یک ایزولاسیون فعال و غیر فعال نشان می دهد. مشاهده می شود که بین مطالعه حاضر و نتایج به دست آمده توسط کاتیس و همکاران (۱۹۹۹) و احمد و الحسینی (۱۹۹۲) همخوانی مناسبی وجود دارد. بنابراین مدل توسعه یافته در این مطالعه شامل شرایط مرزی جذب امواج، به اندازه کافی مشکل انتشار ارتعاش را در مورد ترانشه پر شده با لیکا را پیش بینی می کند.



شکل ۵: حالت ایزولاسیون فعال: مطالعه مقایسه ای در ایزولاسیون ارتعاش توسط ترانشه باز
Figure 5: Active isolation mode: a comparative study on vibration isolation by open trench



شکل ۶: حالت ایزولاسیون غیر فعال: مطالعه مقایسه ای در ایزولاسیون ارتعاش توسط ترانشه باز
Figure 6: Passive Isolation Mode: A Comparative Study in Open Trench Vibration Isolation

از آنجایی که مطالعات زیادی برای کاهش لرزش سطح زمین در خاک ماسه ای در مطالعات گذشته وجود نداشته، بعد از اعتبارسنجی مدل، مشخصات خاک را تغییر می‌دهیم. مشخصات مکانیکی خاک و لیکا استفاده شده در مدل‌سازی عددی با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در [۳۱ و ۳۲] انتخاب گردید. همچنین، به این دلیل که در این مطالعه پارامتریک، تمام پارامترهای مورد تحقیق باید با تقسیم بر طول موج ریلی نرمال می‌شدند، نیاز بود که میزان طول موج ریلی عدد صحیحی باشد که بتوان به راحتی برای پارامترهای مورد بررسی نیز، اعداد صحیحی استخراج کرد. طول موج ریلی با تقسیم میزان سرعت موج ریلی برابر ۲۰۰ متر بر ثانیه بر میزان فرکانس منبع بار معادل ۴۰ هرتز به دست می‌آید. با توجه به مقادیر ارائه شده، میزان طول موج ریلی برای این مطالعه ۵ متر محاسبه شده است. مشخصات مکانیکی خاک و لیکا استفاده شده در مدل‌سازی عددی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مصالح مورد استفاده در این مطالعه [۳۱، ۳۲]

Table 2: Specifications of materials used in this study [31, 32]

ضریب میرایی ریلی	مدول الاستیسته (کیلو نیوتن بر متر مربع)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	نسبت پواسون	وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۰/۰۰۰۳۱۸۳	۲۵۰۰۰۰	۲۱۶	۰/۳	۲۰
-	۲۵۲۰	۵۶/۳	۰/۱	۳

انتخاب مدل رفتاری خاک بر پایه بررسی‌های دقیق و مرور گسترده تحقیقات قبلی در این حوزه صورت گرفته است. مطابق با ادبیات موضوعی، اکثر محققان پیشین تمایل به استفاده از مدل‌های رفتاری الاستیک خطی برای خاک داشته‌اند، زیرا این مدل‌ها برای بیشتر شرایط مطالعاتی و پاسخ‌های خاک به بارگذاری‌های دینامیکی متداول، دقیق و کافی شناخته شده‌اند. تحقیقات نشان داده است که میزان ارتعاش و لرزش ناشی از بارهای معمول در بسیاری از موارد به اندازه‌ای نیست که خاک را وارد حالت الاستوپلاستیک کند یا در آن حالت باقی بماند. این بدین معناست که خاک، حتی تحت تأثیر بارهای دینامیکی، به گونه‌ای رفتار می‌کند که می‌توان آن را با مدل‌های الاستیک خطی به طور مؤثری تحلیل و پیش‌بینی کرد. این انتخاب همچنین توسط یافته‌های محققانی مانند الزاوی، احمد و سایکیا [۱۸، ۲۷ و ۳۲] پشتیبانی می‌شود، که همگی بر دقت و کاربردی بودن مدل‌های الاستیک خطی در ارزیابی پاسخ‌های دینامیکی خاک تأکید دارند. بنابراین، استفاده از این مدل در تحقیق حاضر با هدف اطمینان از اینکه نتایج به دست آمده قابل مقایسه با داده‌های موجود در ادبیات موضوعی باشد و تفسیر آن‌ها بر اساس مبانی علمی معتبر صورت گیرد، انجام شده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اصلی‌ترین عامل مؤثر جنس خاک بر پاسخ‌های ارتعاشی، سرعت موج برشی (V_s) خاک است. این عامل بر رفتار دینامیکی خاک و در نتیجه بر تأثیرگذاری ترانشه‌ها در کاهش ارتعاشات اطراف منبع ارتعاش مؤثر است. در این تحقیق، به منظور حفظ یکپارچگی و قابل مقایسه بودن نتایج، پارامترهای خاک ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

۳- تحلیل و تفسیر نتایج

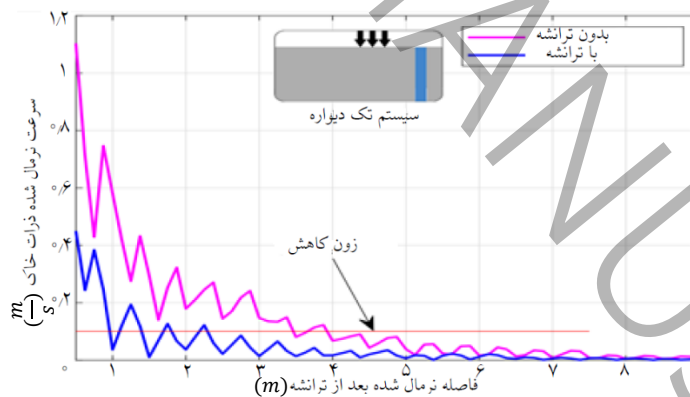
کاهش ارتعاش به دو روش مختلف تقسیم می‌شود، از جمله سیستم فعال، که در آن ترانشه نزدیک به منبع ارتعاش نصب می‌شود، و سیستم غیر فعال، که در آن ترانشه در فاصله ای دورتر از منبع ارتعاش نصب می‌شود. در مورد سیستم فعال، امواج فشاری و برشی در مقایسه با امواج سطحی برجسته تر هستند، در حالی که برای سیستم غیر فعال، هدف اصلی تضعیف امواج سطحی (به ویژه موج ریلی) است.

۱-۳- سیستم ایزولاسیون فعال

برای ارزیابی میزان موثر بودن انواع سیستم‌های ایزولاسیون شامل تک دیواره و دو دیواره بعنوان مانع امواج ناشی از بارگذاری هارمونیک در جهت قائم، مطالعه پارامتریک جامعی انجام گردید. مطالعه پارامتریک با در نظر گرفتن مقادیر نرمال شده مختلف با توجه به طول موج رایلی برای پارامترهای ترانسه شامل عمق D (از $0/4$ تا $1/6$ متر)، عرض W (از $0/05$ تا $0/3$ متر) و طول L (از $0/5$ تا 4 متر) شروع شد. تمامی پارامترها نسبت به طول موج رایلی، که طول آن 5 متر بود، نرمال گردید. به منظور محاسبه تاثیر مکان ترانسه بر میزان کارایی ترانسه پر شده با لیکا، سه مکان مختلف شامل $0/5$ ، $1/25$ و 2 متر انتخاب شد. نتایج نشان دادند که میزان کارایی ترانسه در کاهش لرزش سطح زمین با تغییر مکان ترانسه تغییری نمی‌کند، به همین دلیل تنها نتایج مربوط به موقعیت ($0/5$ متر) در ادامه ارائه می‌شود. مقادیر مطالعات پارامتریک بر اساس پیشنهادات مطالعات [5, 11, 13] انتخاب شد.

۱-۱-۳- سیستم تک دیواره

سرعت نرمال شده ذرات خاک با و بدون اجرای ترانسه، با یکدیگر مقایسه گردید. ترانسه پر شده با لیکا در مکان $0/5$ قرار داده شد و عمق نرمال شده ترانسه برابر با 1 متر در نظر گرفته شده است. نتایج سرعت ذرات خاک در سطح زمین که در شکل ۷ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که میزان سرعت نرمال شده ذرات خاک در سطح زمین، بعد از زون کاهش، برای هر دو حالت با و بدون ترانسه، برای سیستم تک دیواره تفاوت چندانی وجود ندارد. بر همین اساس، برای محاسبه \bar{A}_T ، از $7\lambda_p$ به عنوان منطقه زون کاهش استفاده شد. به عبارت دیگر، میزان کارایی ترانسه در حین مطالعه پارامتریک برای محاسبه میزان کاهش ارتعاش سطح زمین، همیشه تا فاصله نرمال شده $7\lambda_p$ محاسبه می‌شود. این مقدار برای تمامی سیستم‌های ایزولاسیون در حالت فعال استفاده شده است.

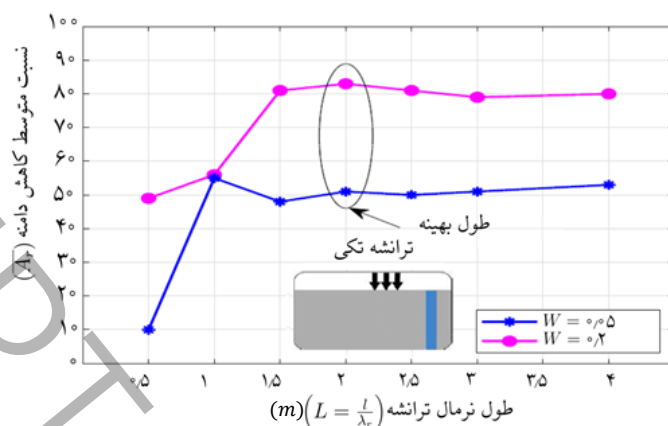


شکل ۷: میزان جابجایی ذرات خاک در سطح زمین قبل و بعد از ایجاد ترانسه ($D=1$ m و $X=0/5$ m)

Figure 7: The displacement of soil particles on the surface of the earth before and after creating a trench ($X=0.5$ m and $D=1$ m)

شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش طول نرمال از $0/5$ تا 2 متر، \bar{A}_T به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. میزان افزایش کارایی ترانسه برای ترانسه باریک، در حدود 40% و برای ترانسه عریض برابر با 30% می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که طول ترانسه، نقش بیشتری برای ترانسه‌های باریک در مقایسه با ترانسه‌های عریض ایفا می‌کند. همچنین، میزان کارایی ترانسه در کاهش ارتعاشات سطح زمین در طول نرمال بیشتر

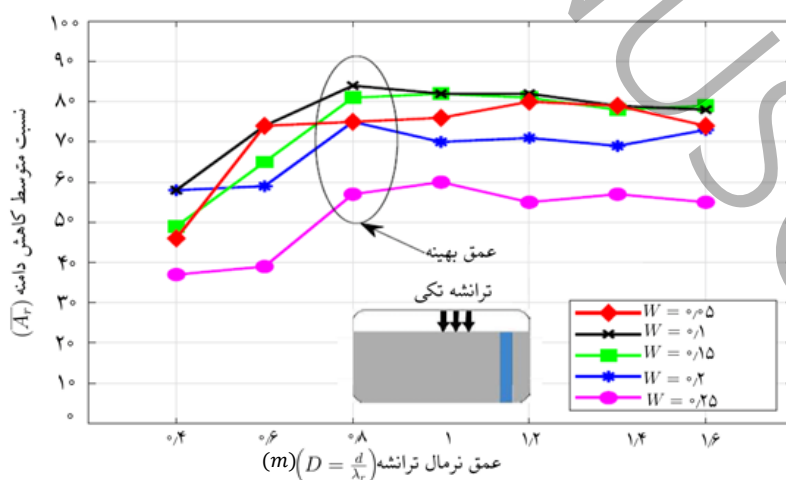
از ۲ متر، تغییری ایجاد نمی‌کند. در نتیجه این مقدار طول ترانشه بطور محافظه کارانه به عنوان طول بهینه قابل استفاده است. همین مطالعه برای سیستم‌های دیگر انجام شد و نتایج یکسانی بدست آمد. بنابراین طول بهینه ترانشه برای سایر سیستم‌ها برابر با ۲ متر انتخاب شد.



شکل ۸: تاثیر طول نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(D=1.2 \text{ m}$ و $X=1.25 \text{ m})$

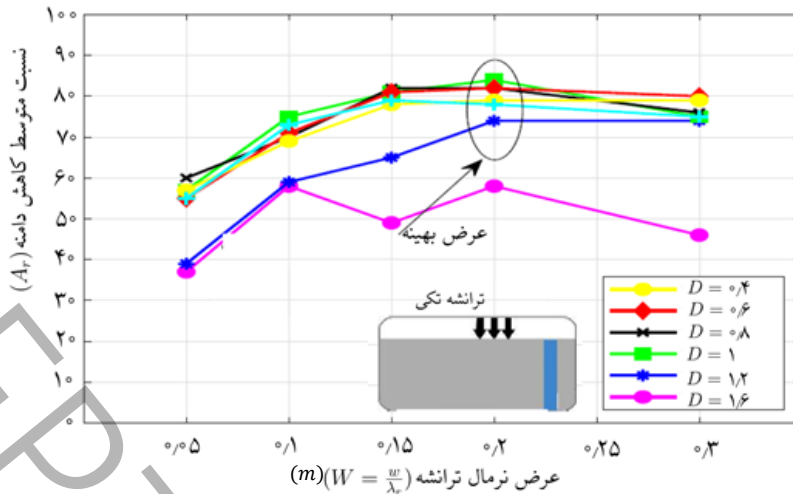
Figure 8: The effect of the normal length of the trench on \bar{A}_r for $(X=1.25 \text{ m}$ and $D=1.2 \text{ m})$

شکل ۹ تاثیر تغییر عمق نرمال ترانشه پر شده با لیکا را در مقابل نسبت متوسط کاهش دامنه را نشان می‌دهد. با افزایش عمق نرمال ترانشه از ۰/۴ به ۰/۸ متر، میرایی قابل ملاحظه‌ای در موج‌های ورودی به سمت ترانشه در تمامی عرض‌ها مشاهده می‌شود و میزان کارایی ترانشه افزایش پیدا می‌کند. این افزایش برای تمام عرض‌های انتخابی به طور متوسط برابر با ۲۰٪ می‌باشد. با افزایش عمق بیش از مقدار ۰/۸ متر تغییرات قابل توجهی در میزان کارایی ترانشه پر شده با لیکا مشاهده نمی‌شود. بنابراین برای مسدود کردن بخش اعظمی از امواج ورودی، عمق نرمال برابر با ۰/۸ متر بعنوان عمق بهینه برای تمامی عرض‌ها تعریف می‌شود. عمق نرمال بهینه ارتباط مستقیمی با عرض ترانشه دارد، که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۹: تاثیر عمق نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(X=0.5 \text{ m})$

Figure 9: The effect of normal trench depth on \bar{A}_r for $(X=0.5 \text{ m})$



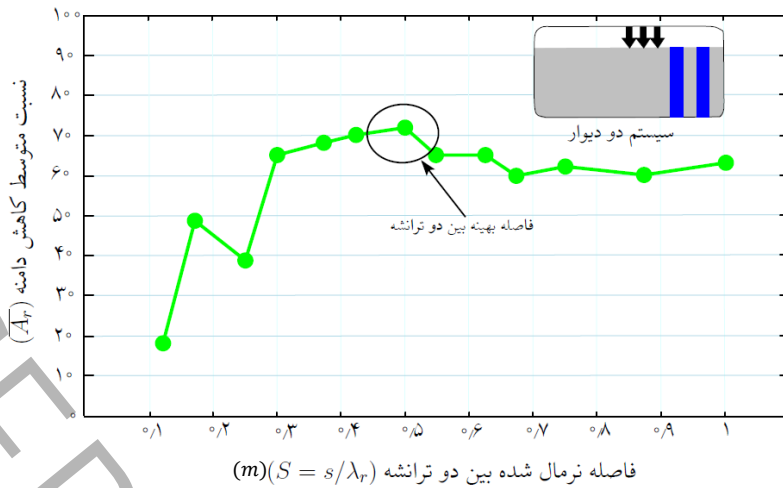
شکل ۱۰: تاثیر عرض نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(X=0.5 \text{ m})$

Figure 10: The effect of the normal width of the trench on \bar{A}_r for $(X=0.5 \text{ m})$

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که W نقش مهمی در اثر کاهش ترانشه پر شده با لیکا ایفا می‌کند. بدیهی است که در حالت کلی با رسیدن W به مقدار 0.2 متر، میرایی امواج به مقدار بیشینه خود نزدیک می‌شود. افزایش عرض ترانشه از 0.05 متر به 0.2 متر میزان کارایی ترانشه پر شده با لیکا را در حدود 30% برای تمام عمق‌ها افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد در ترانشه‌های خیلی عمیق ($D = 1/6m$)، تغییر عرض ترانشه تاثیری بر میزان کارایی ترانشه ندارد. این مسئله نشان می‌دهد که برای کاهش میزان لیکا استفاده شده برای پر کردن ترانشه‌های عمیق، می‌توان از باریک‌ترین ترانشه ($W = 0.05 \text{ m}$) استفاده کرد. برای ترانشه‌های عریض‌تر ($W > 0.2m$)، تاثیر W ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. افزایش عرض ترانشه بدین معناست که فاصله بیشتری بین دو گوشه ترانشه وجود دارد، که این امر باعث ناپوستگی‌های هندسی بیشتر در کناره‌های ترانشه پر شده با لیکا شده و منجر به انکسار بیشتر امواج ورودی می‌گردد.

۲-۱-۳- سیستم دو دیواره

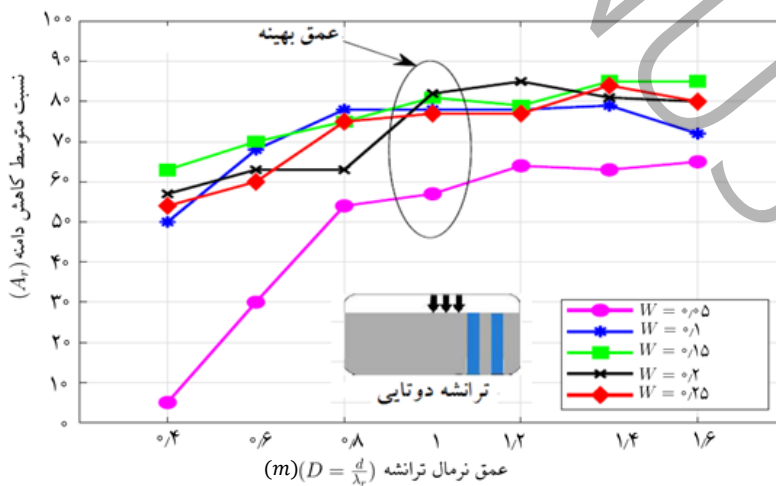
در جایی که اجرای سیستم تک دیواره بعلت عمق زیاد مشکل باشد، میرایی امواج ورودی با اجرای سیستم دو دیواره اهمیت می‌یابد. به این دلیل که استفاده از یک سیستم دو دیواره پر شده با لیکا در مقایسه با سیستم تک دیواره، ممکن است به عمق کمتری نیاز داشته باشد [۲۳]. کارایی سیستم دو دیواره با یک سیستم تک دیواره با عرض، عمق و طول یکسان مقایسه می‌گردد. در ابتدا، برای تعیین فاصله بهینه بین دو دیوار برای رسیدن به بهترین عملکرد، ترانشه مورد نظر در فاصله $1/25$ متر و با عمق نرمال 1 متر در مقابل منبع بار در نظر گرفته شد. بر مبنای نتایج مطالعه پارامتریک که در شکل ۱۱ ارائه شده است، مشخص گردید که فاصله نرمال بهینه برابر با 0.5 متر می‌باشد. این فاصله در انطباق با یافته‌های مرجع [۱۰] برای فاصله بهینه بین ترانشه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۱: تاثیر فاصله نرمال بین دو دیواره ترانشه روی \bar{A}_r برای $(D=1\text{ m}$ و $X=0.5\text{ m})$

Figure 11: The effect of the normal distance between two trench walls on \bar{A}_r for $(X=0.5\text{m}$ and $D=1\text{m})$

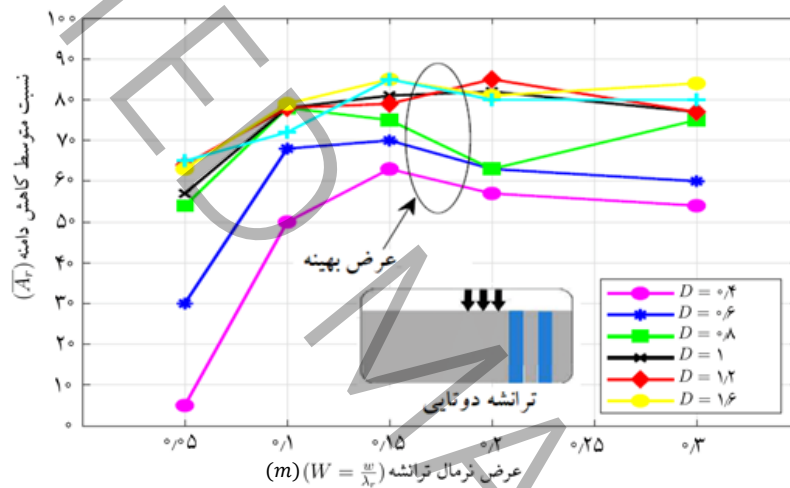
همچنین شکل ۱۲ نشان می‌دهد که پارامتر D برای عمق نرمال بین 0.4 تا 1 متر برای تمامی عرض‌ها، در کاهش و دفع امواج موثر می‌باشد. میزان این افزایش کارایی برای ترانشه‌های عریض $(W > 0.1)$ در حدود 20% می‌باشد. ولی رفتار ترانشه نازک $(W > 0.05\text{m})$ کمی نسبت به ترانشه‌های عریض تر متفاوت است. برای این ترانشه، روند افزایشی با تغییر عمق ترانشه بین 0.4 تا 1 متر مشاهده می‌شود، ولی این افزایش که حدود 50% می‌باشد، در مقایسه با سایر ترانشه‌ها قابل توجه است. عمق بهینه تقریباً برابر با 1 متر برای تمامی ترانشه‌ها انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با ترانشه‌های عریض تر، پارامتر D نقش معنادارتری برای ترانشه‌های باریک تر ایفا می‌کند. در گوشه‌های ترانشه به علت عبور امواج ورودی از لبه‌های موانع به پشت آن، امواج سطحی رایلی به امواج حجمی (موج S و P) تبدیل می‌شوند. بعلت فاصله کوتاه تر بین دو گوشه یک ترانشه اثر انکسار امواج در یک ترانشه باریک $(W = 0.05\text{m})$ کمتر بوده و به همین دلیل اثر پارامتر D مشهودتر است. برای ترانشه‌های عریض تر $(W > 0.05\text{m})$ تاثیر پدیده انکسار بیشتر ناشی از پارامتر D می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت پدیده انکسار نقش مهمی در فرایند میرایی امواج در سیستم دو دیواره ایفا می‌کند.



شکل ۱۲: تاثیر عمق نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(X=0.5\text{ m})$

Figure 12: The effect of the normal depth of the trench on \bar{A}_r for $(X=0.5\text{ m})$

همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده گردید با افزایش عرض نرمال از $0/05$ تا تقریباً $0/18$ متر کارایی ترانشه به میزان حدوداً 20% برای ترانشه‌های عمیق ($D > 0.8m$) افزایش می‌یابد. ولی این افزایش برای ترانشه‌های کم عمق در ازای همان میزان افزایش عرض، تقریباً برابر است با 50% می‌باشد. بنابراین با رسیدن W به مقدار $0/18$ متر، کارایی ترانشه ثابت باقی می‌ماند. نتایج تاثیر عمق ترانشه بر کاهش امواج سطحی نشان داد که برای دستیابی به میزان کارایی تقریبی 60 تا 80 درصد، عمق بهینه حداقل برابر با 1 متر نیاز است. بعلاوه، تاثیر W برای موانع با D بزرگتر از 1 متر کمتر می‌باشد و نمودارهای ترانشه‌های عمیق تر برای رسیدن به عرض بهینه ($0/18$ متر) از نقطه شروع ($W = 0/05m$) با شیب ملایم تری حرکت می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که تاثیر عرض ترانشه پر شده با لیکا، برای عمق‌های بزرگتر از عمق بهینه ($D = 1m$) کمتر است (شکل ۱۳). بنابر تئوری توسعه داده شده توسط مرجع [۲۹]، انرژی امواج رایلی در ناحیه ای بین سطح زمین و طول موج آن در ناحیه سمت چپ ترانشه پر شده با لیکا بطور ناقص منعکس می‌شود. انرژی موج رایلی با عبور از زیر ترانشه یک موج رایلی جدید بعد از ترانشه می‌سازد. انرژی موج عبوری در ناحیه بعد از ترانشه ارتعاشاتی ایجاد می‌کند. افزایش عرض ترانشه امواج بیشتری را مسدود نموده و منجر به عبور تعداد کمتری از امواج ورودی می‌گردد.



شکل ۱۳: تاثیر عرض نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(X=0/5 m)$

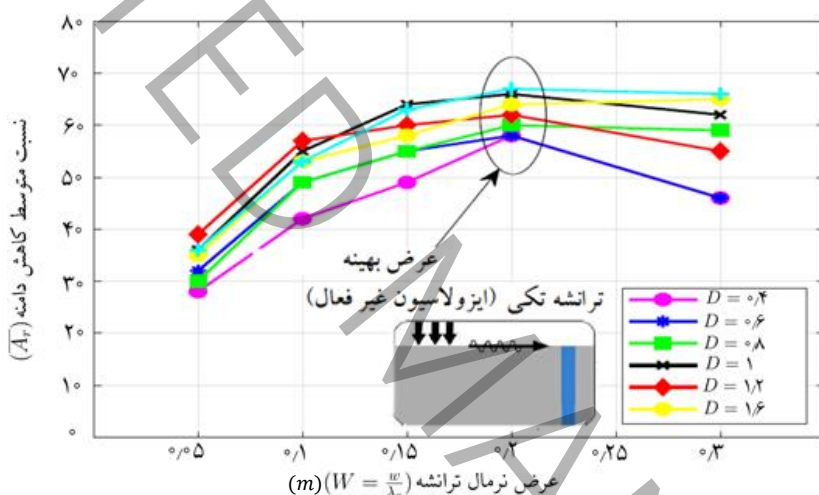
Figure 13: The effect of the normal width of the trench on \bar{A}_r for $(X=0.5 m)$

۲-۳- سیستم ایزولاسیون غیر فعال

به منظور ارائه نتایج تحلیل پارامتریک، یک مدل عددی اجزا محدود دو بعدی در محدوده زمان ساخته شد. افزایش فاصله نرمال بین ترانشه و منبع ارتعاش باعث می‌شود که انرژی امواج رایلی در مقایسه با امواج حجمی افزایش پیدا کند و این پدیده باعث ایجاد امواج صفحه ای می‌شود [۳، ۸]. صرفه جویی در زمان اجرای مدل دلیل دیگری است که می‌توان از آن استفاده نمود. چون ابعاد مدل هندسی حالت غیر فعال بزرگتر از حالت فعال می‌باشد، تحلیل چند مدل عددی نیازمند مقدار قابل توجهی زمان می‌باشد. همچنین چندین محقق نشان داده اند که نتایج تحلیل‌های دو بعدی و سه بعدی در توافق قابل قبولی با یکدیگر می‌باشند [۳-۸، ۱۱-۲۱]. به منظور مطالعه میزان موثر بودن ترانشه، پارامترهای مختلفی نظیر عمق، عرض و موقعیت ترانشه در نظر گرفته شد. تغییرات فاکتورهای ابعادی ترانشه (نظیر عمق و عرض) مشابه رویه مورد استفاده در ایزولاسیون فعال بررسی گردید. مشابه با تحلیل‌های سیستم فعال، هم حالت تک دیواره و هم حالت دو دیواره و همچنین تحلیل اثر تغییرات ابعاد هندسی ترانشه برای سیستم غیر فعال انجام شد.

۱-۲-۳-سیستم تک دیواره

در این قسمت فاصله بین ترانشه پر شده با لیکا و منبع بار برابر با ۳ متر اتخاذ گردید. کاهش قابل توجهی در جابجایی قائم زمین قبل و بعد از نصب ترانشه پر شده با لیکا با فاصله نرمال ۱۰ متر نشان داد، که این مقدار از فاصله نرمال برای محاسبه \bar{A}_r انتخاب گردید. نتایج تغییرات \bar{A}_r بعنوان تابعی از W در شکل ۱۴ ارائه شد. نتایج بررسی این نمودار نشان می‌دهد که رابطه اساسی بین \bar{A}_r محاسباتی و عمق نرمال وجود ندارد. به این دلیل که فاصله بین نمودارهای رسم شده با رنگ‌های متفاوت که مربوط به عمق‌های مختلف هستند، اختلاف کمی با هم دارند که قابل چشم پوشی است. این اختلاف کم نشان می‌دهد که افزایش عمق ترانشه تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان کارایی ترانشه ایجاد نمی‌کند. از سوی دیگر افزایش ضخامت دیواره منجر به پراکندگی بیشتر ارتعاشات زمین ناشی از منبع ارتعاش می‌گردد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد، با افزایش W از ۰/۰۵ تا ۰/۲ متر برای تمامی اعماق ترانشه افزایشی معادل ۳۰٪ حاصل شده و بنظر می‌رسد که $W = 0.2m$ عرض بهینه‌ای برای دستیابی به مقدار معقولی از میرایی می‌باشد. افزایش در عرض ترانشه منجر به ناپیوستگی بیشتری در سطح زمین با خواص دینامیکی مختلف می‌گردد و این تغییرات باعث انکسار امواج ورودی می‌شود.

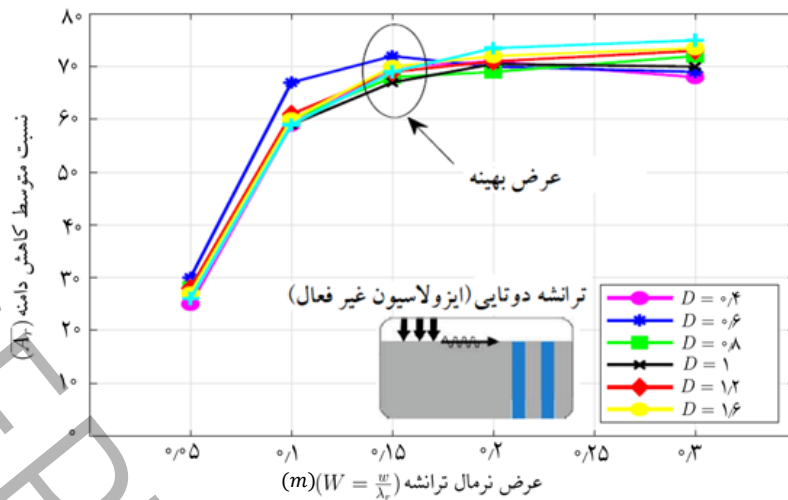


شکل ۱۴: تأثیر عرض نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(X=3m)$

Figure 14: The effect of the normal width of the trench on \bar{A}_r for $(X=3m)$

۲-۲-۳-سیستم دو دیواره

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تغییرات عمق ترانشه بر روی \bar{A}_r تأثیری ندارد و حتی افزایش W نیز باعث تغییر نحوه تأثیرگذاری D روی \bar{A}_r نمی‌شود. همچنین، مقایسه شکل ۱۵ با شکل ۱۴ نشان می‌دهد که عمق ترانشه در سیستم دو دیواره حتی تأثیر کمتری نسبت به سیستم تک دیواره دارد. به این دلیل که فاصله بین خطوط با رنگ‌های مختلف در سیستم دو دیواره در مقایسه با سیستم تک دیواره خیلی نزدیک به هم هستند. برخی از امواج ریلی پس از برخورد با لبه سمت چپ اولین دیوار به سمت چپ ترانشه و به سمت پایین منعکس شده و بقیه امواج به سمت راست ترانشه گسیل می‌شوند. متعاقباً امواج عبوری در ناپیوستگی بین دو دیوار، دوباره منعکس می‌شوند. در حقیقت انکسار و تبدیل امواج از سطحی به حجمی ناشی از گوشه‌های دو ترانشه در مقایسه با عمق، نقش مهم‌تری در امواج ریلی ورودی ایفا می‌کند. به همین دلیل، افزایش عمق ترانشه تغییر قابل توجهی در میزان افزایش کارایی ترانشه ایجاد نمی‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش عرض ترانشه منجر به کاهش بیشتر امواج شده و بنظر می‌رسد که W فرایند کاهش و انسداد را کنترل می‌کند. افزایش عرض ترانشه از ۰/۰۵ متر به ۰/۱۵ متر منجر به افزایش کارایی ترانشه در حدود ۴۰٪ برای همه ی عمق‌ها می‌شود و با افزایش مقدار عرض ($W < 0.15$), میزان کارایی ترانشه تغییر چشم‌گیری نمی‌کند و تقریباً ثابت می‌ماند.



شکل ۱۵: تاثیر عرض نرمال ترانشه روی \bar{A}_r برای $(X=3\text{ m})$
 Figure 15: The effect of the normal trench width on \bar{A}_r for $(X=3\text{m})$

هنگامی که ضخامت ترانشه به مقدار مشخص می‌رسد ($W = 0/15m$)، افزایش عرض ترانشه ($W > 0/15m$) برای تمامی اعماق به سختی کاهش امواج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. افزایش عرض نرمال منجر به ناپیوستگی بیشتر در سطح زمین می‌گردد که باعث دفع بیشتر ارتعاشات ناشی از زمین می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مطالعه پارامتری برای ارزیابی تأثیر عوامل مهم از جمله عمق، عرض و طول ترانشه بهسازی شده با سبکدانه لیکا در حالت فعال و غیر فعال انجام و نتایج با هم مقایسه شده و دو سیستم مختلف از جمله دیوار تک لایه و دو دیواره برای ارزیابی تأثیر شکل ترانشه بر میزان کاهش امواج لرزه ای ورودی در سطح زمین انتخاب گردیده است. همچنین، به منظور افزایش سرعت تحلیل، پروسه اتوماتیک سازی مدل عددی از طریق کوپل کردن پلکسیس و پایتون انجام شده است. نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک بصورت زیر بدست آمد:

۱- مطالعات پارامتریک ایزولاسیون فعال و غیر فعال نشان داد که ناحیه $0.7\lambda_r$ و $1.0\lambda_r$ بعنوان نواحی بحرانی پس از ترانشه برای محاسبه \bar{A}_r می‌باشد. این یافته ثابت می‌کند که سیستم ایزولاسیون ارتعاشات باید به سیستمهای فعال و غیر فعال در خلال تحلیل تبدیل شود.

۲- تحلیل نتایج سیستم ایزولاسیون فعال نشان داد که برای رسیدن به بالاترین مقدار کارایی، برای هر دو سیستم شامل تک دیواره و دو دیواره، طول بهینه بایستی برابر $2\lambda_r$ در نظر گرفته شود. اعماق $0.8\lambda_r$ و $1\lambda_r$ بترتیب بعنوان عمق بهینه برای سیستم تک دیواره و دو دیواره در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن تاثیر عرض ترانشه پر شده با لیکا نتیجه گرفته شد که، W برابر با 0.2 متر برای رسیدن به W بهینه بترتیب برای سیستم تک دیواره و دو دیواره کافی است.

۳- از سوی دیگر ارزیابی ایزولاسیون غیر فعال نشان داد که عمق ترانشه به سختی میزان کارایی سیستم تک دیواره و دو دیواره را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در صورتیکه $D > 0.5m$ باشد، تاثیر D قابل اغماض است. با این وجود چون میزان کارایی ترانشه با افزایش D بصورت تدریجی و مداوم افزایش می‌یابد، تعیین میزان عمق بهینه امکان پذیر نیست. برای دستیابی به یک سیستم تک دیواره قابل قبول، عرض نرمال باید تا مقدار تقریبی 0.2 متر افزایش یابد. برای دستیابی به میزان قابل قبولی از کارایی برای سیستم دو دیواره، W باید حداقل 0.15 متر باشد.

بطور کلی نتیجه گیری به دست آمده از این تحلیل ها نشان می دهند که مکان ترانشه به عنوان یک فاکتور مؤثر در میزان کارایی ترانشه های پر شده با لیکا نقشی بازی نمی کند. به بیان دیگر، تغییرات در مکان ترانشه (X)، تأثیر قابل توجهی بر میزان کاهش ارتعاش ایجاد نکرد. این یافته ها نشان می دهند که در طراحی ترانشه های بهسازی شده با لیکا برای کاهش ارتعاش، مکان قرارگیری ترانشه نسبت به منبع ارتعاش اولویت کمتری دارد و می توان بر روی سایر پارامترهای مؤثر مانند عمق، عرض و مشخصات مواد پرکننده تمرکز بیشتری نمود.

مراجع

- [1] G. Miller, H. Pursey, E.C. Bullard, On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 233(1192) (1955) 55-69.
- [2] F.E. Richart, J.R. Hall, R.D. Woods, *Vibrations of soils and foundations*, (1970).
- [3] T.M. Al-Hussaini, *Vibration isolation by wave barriers*, State University of New York at Buffalo, (1992).
- [4] K.R. Massarsch, *Vibration isolation using gas-filled cushions*, in: *Soil dynamics symposium in honor of professor Richard D. Woods*, (2005), pp. 1-20.
- [5] E. Mahdavisefat, H. Salehzadeh, A. Heshmati, Full-scale experimental study on screening effectiveness of SRM-filled trench barriers, *Géotechnique*, 68(10) (2018) 869-882.
- [6] P. Coulier, V. Cuéllar, G. Degrande, G. Lombaert, Experimental and numerical evaluation of the effectiveness of a stiff wave barrier in the soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77 (2015) 238-253.
- [7] G. Gao, Q. Zhang, J. Chen, Q. Chen, Field experiments and numerical analysis on the ground vibration isolation of wave impeding block under horizontal and rocking coupled excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115 (2018) 507-512.
- [8] T. Bose, D. Choudhury, J. Sprengel, M. Ziegler, Efficiency of open and infill trenches in mitigating ground-borne vibrations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8) (2018) 04018048.
- [9] R.D. Woods, Screening of surface wave in soils, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 94(4) (1968) 951-979.
- [10] D. Ulgen, O. Toygar, Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: a full-scale experimental study, *Construction and Building Materials*, 86 (2015) 12-20.
- [11] A. Alzawi, M.H. El Naggar, Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3) (2011) 306-317.
- [12] X. Pu, Z. Shi, H. Xiang, Feasibility of ambient vibration screening by periodic geofom-filled trenches, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104 (2018) 228-235.
- [13] E. Çelebi, S. Firat, G. Beyhan, İ. Çankaya, İ. Vural, O. Kurtel, Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 29(5) (2009) 824-833.
- [14] C. Murillo, L. Thorel, B. Caicedo, Ground vibration isolation with geofom barriers: Centrifuge modeling, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6) (2009) 423-434.
- [15] D. Beskos, B. Dasgupta, I. Vardoulakis, Vibration isolation using open or filled trenches: Part 1: 2-D homogeneous soil, *Computational mechanics*, 1 (1986) 43-63.
- [16] D.E. Beskos, *Boundary element methods in dynamic analysis: Part II (1986-1996)*, (1997).
- [17] 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.
- [18] W. Haupt, *Wave propagation in the ground and isolation measures*, (1995).
- [19] W. Haupt, Isolation of vibrations by concrete core walls, in: *Proceedings of the ninth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, (1977), pp. 251-256.
- [20] S.D. Ekanayake, D. Liyanapathirana, C.J. Leo, Attenuation of ground vibrations using in-filled wave barriers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67 (2014) 290-300.
- [21] D. Liyanapathirana, S.D. Ekanayake, Application of EPS geofom in attenuating ground vibrations during vibratory pile driving, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1) (2016) 59-69.
- [22] A. Saikia, Numerical study on screening of surface waves using a pair of softer backfilled trenches, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 65 (2014) 206-213.
- [23] M. Schevenels, G. Lombaert, Double wall barriers for the reduction of ground vibration transmission, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97 (2017) 1-13.
- [24] M. Esmaeili, J.A. Zakeri, S.A. Mosayebi, Investigating the optimized open V-shaped trench performance in reduction of train-induced ground vibrations, *International Journal of Geomechanics*, 14(3) (2014) 04014004.

- [25] J.-A. Zakeri, M. Esmaeili, S.-A. Mosayebi, Numerical investigation of the effectiveness of a step-shaped trench in reducing train-induced vibrations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(3) (2014) 298-306.
- [26] A. Alzawi, M.H. El Naggar, P.D. Eng, Numerical investigations on vibration screening by in-filled geofom trenches, in: 64rd Canadian Geotechnical Conference, Toronto, ON, Canada, (2011).
- [27] R.L. Kuhlemeyer, J. Lysmer, Finite element method accuracy for wave propagation problems, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5) (1973) 421-427.
- [28] H.-J. Dolling, Abschirmung von erschütterungen durch bodenschlitze, *Die Bautechnik*, 5 (1970) 151-158.
- [29] 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.
- [30] Sprengel, J., *Praktische Anwendung injizierter Isolierkörper als Erschütterungsreduktionsmaßnahme* (Doctoral dissertation, Dissertation, RWTH Aachen University, (2017).
- [31] A. Zukri, Application of Finite Element Modelling to Lightweight Aggregate (LECA) Column-Raft, *International Journal of Integrated Engineering*, 11(9) (2019) 212-223.
- [32] O. Tavasoli, M. Ghazavi, Wave propagation and ground vibrations due to non-uniform cross-sections piles driving, *Computers and Geotechnics*, 104 (2018) 13-21.