



Investigating on the performance of retrofitted trench with Leca in reducing ground vibrations

Mohsen Naghizadeh Rokni¹, Omid Tavasoli^{2*}, Reza Esmailabad¹, Amirpouya Saraf¹

¹ Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

² Department of Civil Engineering, East Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Environmental vibrations can have a significant impact on noise pollution and the health of the residents of buildings adjacent to the vibration sources. Therefore, the studies conducted in the last two decades on reducing vibrations have attracted a lot of attention from researchers. In this study, the effect of different types of improved trenches with Leca lightweight aggregate, including single and double-walled trenches in both active and passive modes, has been investigated, using the combination of Plexis3D finite element software and Python programming language, and the models with the results of other researches. It has been validated and also, a parametric study has been done to evaluate the effect of geometrical factors including depth, width, and length for both systems. The obtained results indicate that in order to achieve an acceptable amount of trench efficiency, the depth of 0.8λ and 1λ is sufficient as the optimal depth for single and wall systems, respectively, and considering the effect of the width of the trench filled with Leca, a width equal to 0.2λ and 0.15λ is enough to reach the optimal width for single-wall and double-wall systems, respectively. Also, for passive design, the role of depth can be ignored for single and double-walled barriers, because trench width plays a more important role compared to trench depth. Moreover, to achieve an acceptable single-wall system, the normal width should be increased to about 0.2λ .

Review History:

Received: Dec. 18, 2023

Revised: Feb. 29, 2024

Accepted: Apr. 20, 2024

Available Online: May, 03, 2024

Keywords:

Retrofitted Trench

Leca

Ground Vibration

Harmonic Load

Numerical Modeling

1- Introduction

Most of the vibrational energy emitted near the surface of the earth spreads through Rayleigh waves [1]. Therefore, constructing a trench in the path of vibration is an appropriate solution, as it leads to the dispersion and reduction of wave vibrations [2]. This wall, through a complex interaction of waves including reflection, refraction, bending, and interference, cuts off, weakens, and disperses the emitted waves. The reduction and weakening of waves are classified into two general groups: an active design where the trench is installed near the vibration source, and a passive design where the trench is constructed away from the vibration source. Moreover, the practicality of wave barriers is also classified into two cases: open and filled trenches [3]. Woods was the first to conduct a full-scale experiment to assess the effectiveness of open trenches, suggesting that a trench is effective in reducing incoming waves if it blocks at least 75% of the waves [4]. However, due to construction and stability issues, open trenches are not practical in many cases over long periods, and filled trenches are usually used instead. Also, to understand the effectiveness of open and Leca-filled trenches, field studies have shown that the performance of open and Leca-filled trenches is 68% and 67% effective,

respectively [5]. Selby and colleagues conducted various field experiments to calculate the reduction effect of open trenches filled with hard and soft materials in active and passive designs. The results show that active isolation is more effective than passive isolation, and soft fill materials are more effective than hard materials in damping incoming waves [6]. The effect of geometric factors of Leca-filled trenches in reducing incoming waves was conducted in a parametric study using a centrifuge device, and the results show that the wave reduction performance depends on the depth of the trench [7].

2- METHODOLOGY

In this article, a novel method for automating parametric studies using a combination of PLAXIS and Python has been investigated. This approach, developed using Python scripts to reduce time and increase accuracy in modeling ground vibrations, allows various finite element model settings to be applied quickly and precisely through these scripts, as indicated in Fig. 1. This enables extensive investigation of the impact of various geometric and physical factors on vibration reduction. The results from this automated study show high accuracy compared to existing data from similar studies.

*Corresponding author's email: omid.tavasoli@iau.ac.ir



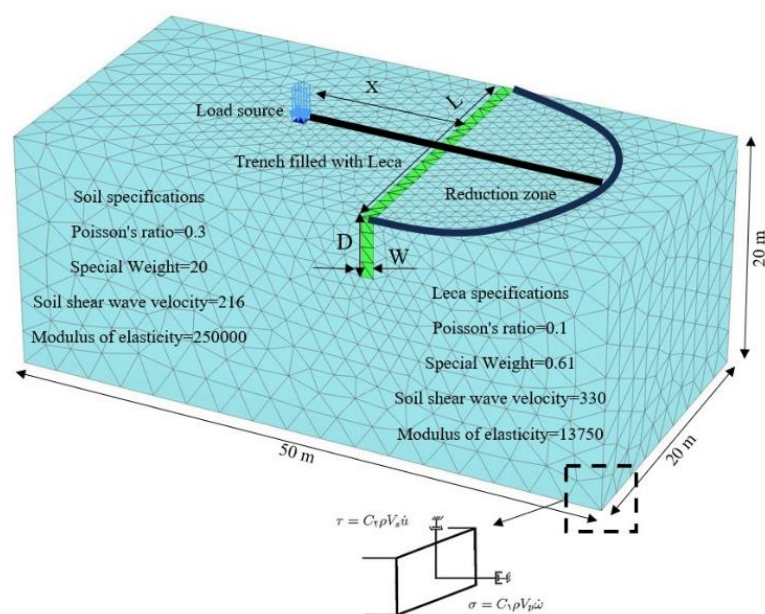


Fig. 1. Geometry of the model in this study

Automating modeling using PLAXIS in this research has led to significant benefits. This method enables faster and more precise execution of parametric studies, especially in projects with a wide range of variable conditions. In addition to field and laboratory tests, numerical methods such as the finite element method and the boundary element method are used as powerful tools for examining and evaluating the reduction performance of wave barriers.

3- RESULTS AND DISCUSSION

The normalized speed of soil particles was compared in scenarios with and without a trench implementation. A trench filled with Leca was strategically placed at 0.5 meters, and its normalized depth was set at 1 meter. The findings revealed that the normalized speed of soil particles on the ground surface, beyond the reduction zone, exhibits no significant differences between the scenarios with and without the trench for a single-wall system. Further analysis demonstrated that with an increase in the normalized length of the trench from 0.5 to 2 meters, there is a notable increase in trench efficiency. The efficiency improves by approximately 40% for narrow trenches and about 30% for wide trenches, highlighting that trench length plays a more significant role in vibration reduction for narrower trenches compared to wider ones. Moreover, the effectiveness of the trench in reducing surface vibrations does not change for lengths greater than 2 meters, suggesting that this length can conservatively be considered optimal for use across various systems. In cases where the implementation of a single-wall system is challenging due to excessive depth, the effectiveness of wave damping with

a double-wall system becomes significant. This is because using a double-wall system filled with Leca may require less depth compared to a single-wall system.

In this study, the distance between the trench filled with Leca and the vibration source was set at 3 meters. A significant reduction in vertical ground displacement was observed both before and after the installation of the trench, which was placed at a normalized distance of 10 meters from the source. This normalized distance was chosen to calculate the average reduction amplitude. The results indicate that there is no fundamental relationship between the calculated and the normalized depth since the differences between the curves drawn for various depths are minimal and negligible. This slight variation suggests that increasing the depth of the trench does not significantly change its efficiency. Conversely, increasing the thickness of the trench walls leads to greater dispersion of ground vibrations from the vibration source. As the width (W) of the trench increases from 0.05 meters to 0.2 meters, there is a 30% improvement in trench efficiency across all depths, indicating that a width of 0.2 meters is considered optimal for achieving a reasonable level of damping.

For systems with double walls, changes in trench depth do not affect the average reduction amplitude, and increasing the width (W) does not alter how depth (D) influences. A comparison of the efficiency of the trench in double-wall systems shows even less impact on depth compared to single-wall systems because the lines representing different depths are very close together. Some of the Rayleigh waves, after hitting the edge of the first wall, are reflected downwards and

to the left towards the trench, while others are transmitted to the right of the trench. Subsequently, the transmitted waves are reflected again at the discontinuity between the two walls.

4- CONCLUSION

In this article, a parametric study to evaluate the effect of important factors such as the depth, width, and length of the improved trench with Leca lightweight aggregate in active and passive mode was carried out and the results were compared and two different systems including single and double-layer wall. It has been chosen to evaluate the effect of the trench shape on the reduction of incoming seismic waves on the ground surface. Also, to increase the speed of analysis, the numerical model automation process has been done by coupling PLAXIS and Python.

In general, the conclusions obtained from these analyses show that the location of the trench does not play a role as an effective factor in the efficiency of the trenches filled with Leca. In other words, changes in trench location (X) did not significantly affect the amount of vibration reduction. These findings show that in the design of improved trenches with Leca to reduce vibration, the location of the trench is less important than the source of vibration, and it is possible to focus more on other effective parameters such as depth, width, and characteristics of filling materials.

References

- [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] R.D. Woods, Screening of surface wave in soils, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 94(4) (1968) 951-979.
- [5] D. Ülgen, O. Toygar, Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: a full-scale experimental study, *Construction and Building Materials*, 86 (2015) 12-20.
- [6] E. Çelebi, S. Fırat, 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.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] D. Liyanapathirana, S.D. Ekanayake, Application of EPS geof foam in attenuating ground vibrations during vibratory pile driving, *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1) (2016) 59-69.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Sprengel, J., *Praktische Anwendung injizierter Isolierkörper als Erschütterungsreduktionsmaßnahme* (Doctoral dissertation, Dissertation, RWTH Aachen University, (2017).
- [13] A. Zukri, Application of Finite Element Modelling to Lightweight Aggregate (LECA) Column-Raft, *International Journal of Integrated Engineering*, 11(9) (2019) 212-223.
- [14] O. Tavasoli, M. Ghazavi, Wave propagation and ground vibrations due to non-uniform cross-sections piles driving, *Computers and Geotechnics*, 104 (2018) 13-21.



بررسی عملکرد ترانشه 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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴

کلمات کلیدی:

ترانشه بهسازی شده
سبکدانه لیکا
ارتعاش سطح زمین
بار هارمونیک
مدلسازی عددی

خلاصه: 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 ترانشه بهسازی شده با سبکدانه لیکا شامل ترانشه‌های 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 ترانشه، عمق $0.8\lambda_p$ و $1\lambda_p$ به ترتیب به عنوان عمق بهینه برای سیستم‌های تک و دیواره کافی است و با در نظر گرفتن اثر عرض ترانشه پر شده با لیکا، عرضی معادل $0.2\lambda_p$ و $0.15\lambda_p$ 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 ترانشه در مقایسه با عمق ترانشه نقش مهم تری دارد. اما برای دستیابی به یک سیستم تک جداره قابل قبول، باید عرض نرمال را تا حدود $0.2\lambda_p$ افزایش داد.

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 ترانشه در مسیر ارتعاش راه حلی مناسب می‌باشد، زیرا این ترانشه منجر به پخش و کاهش ارتعاشات موج در زمین می‌گردد [۲]. این دیواره به وسیله حالت پیچیده ای از برهم نهی امواج شامل انعکاس، انکسار، انحنا و تداخل، امواج گسیل شده را قطع، تضعیف و پخش می‌کند. تقلیل و تضعیف امواج در دو گروه کلی شامل طرح فعال که در آن ترانشه در نزدیکی منبع ارتعاش نصب شده است و طرح غیر فعال که در آن ترانشه دور از منبع ارتعاش ساخته شده است، طبقه بندی می‌شوند و از سوی دیگر، عملی بودن مانع موج در دو حالت ترانشه باز و پر نیز طبقه بندی می‌گردد [۳].

به منظور ارزیابی میزان موثر بودن ترانشه 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 ترانشه‌های باز، یک آزمایش تمام مقیاس را انجام داده و پیشنهاد نمود، که در صورتی یک ترانشه در کاهش امواج واصله موثر است، که حداقل ۷۵ درصد امواج را دفع کند [۹]. با این وجود به علت مشکلات ساخت و پایداری، ترانشه‌های باز در بسیاری از موارد در زمان‌های طولانی کاربردی نمی‌باشند و در چنین مواردی معمولاً از ترانشه‌های پر استفاده می‌شود. همچنین جهت درک میزان موثر بودن ترانشه باز و پر شده با لیکا، مطالعات میدانی انجام شده نشان می‌دهند که، عملکرد ترانشه باز و پر شده با لیکا بترتیب ۶۸ و ۶۷ درصد می‌باشد. همچنین جهت ارزیابی موثر بودن ترانشه در کاهش امواج ورودی در محدوده فرکانس، چندین ردیف از موانع پر شده با ژئوفوم استفاده شده است و افزایش عمق ترانشه به بیش از یک طول موج، اثر قابل اغمازی



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 خودکار، دقت بالایی در مقایسه با داده‌های موجود از مطالعات مشابه نشان می‌دهد. خودکارسازی 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 شده اند. پارامترهای مختلف، از جمله عوامل هندسی و ابعادی که بر عملکرد کاهش ارتعاش حاکم هستند، در نظر گرفته شده اند. علاوه بر این، یک مدل کوپل از پلکسیس-پایتون برای خودکارسازی مطالعه پارامتریک توسعه داده 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 کاهشی موانع امواج قابل استفاده و کاربردی است.

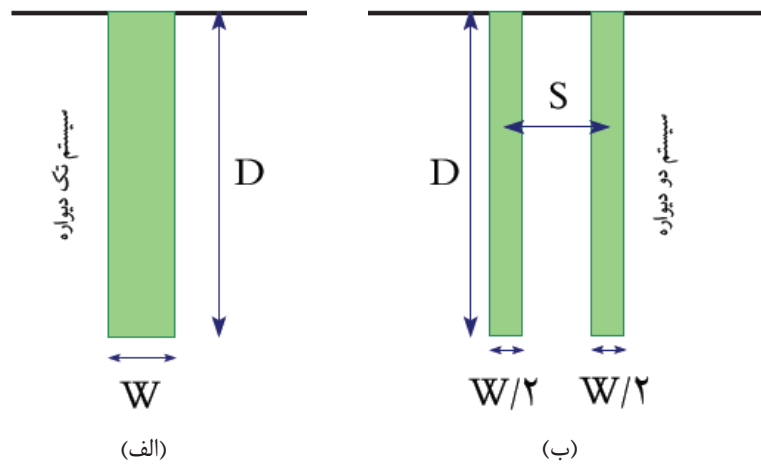
۲- مدل‌سازی سه بعدی تأثیر ترانسه اصلاح شده با سبکدانه لیکا در ارتعاشات محیطی و اعتبارسنجی آن

روش مورد استفاده برای انجام مطالعات در این مقاله شامل تعریف مشخصات سیستم های مختلف ترانسه (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

روی عملکرد ترانسه در طرح غیرفعال دارد [۱۰-۱۲]. سلبی^۱ و همکاران به منظور محاسبه اثر کاهشی ترانسه باز پرشده 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]. تأثیر عوامل هندسی ترانسه پرشده 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^۲ و همکاران به منظور تعیین قابلیت کاهشی ترانسه‌های باز و پرشده 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^۳ به تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و مصالح بر روی اثر کاهشی ترانسه های مستطیلی باز و پر شده با بتن پرداختند و یک مدل ساده برای ایزولاسیون امواج در طرح‌های فعال و غیرفعال ارائه دادند [۱۸]. هاوپت^۴ 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 $R(\lambda_p)$ باشد [۱۹]. [۲۰]. برای تعیین میزان موثر بودن ترانسه‌های پرشده 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، بهینه‌سازی انواع مختلف از دیوارهای حائل شامل دیواره‌ی تک و دوگانه، براساس دستیابی به کارایی مطلوب که ۷۵٪ کاهش در میزان لرزش سطح زمین است، می باشد.

در این مقاله، روشی نوین برای خودکارسازی مطالعه پارامتریک

- 1 Celebi
- 2 Beskos
- 3 Ahmad and Al-Hussaini
- 4 Haupt

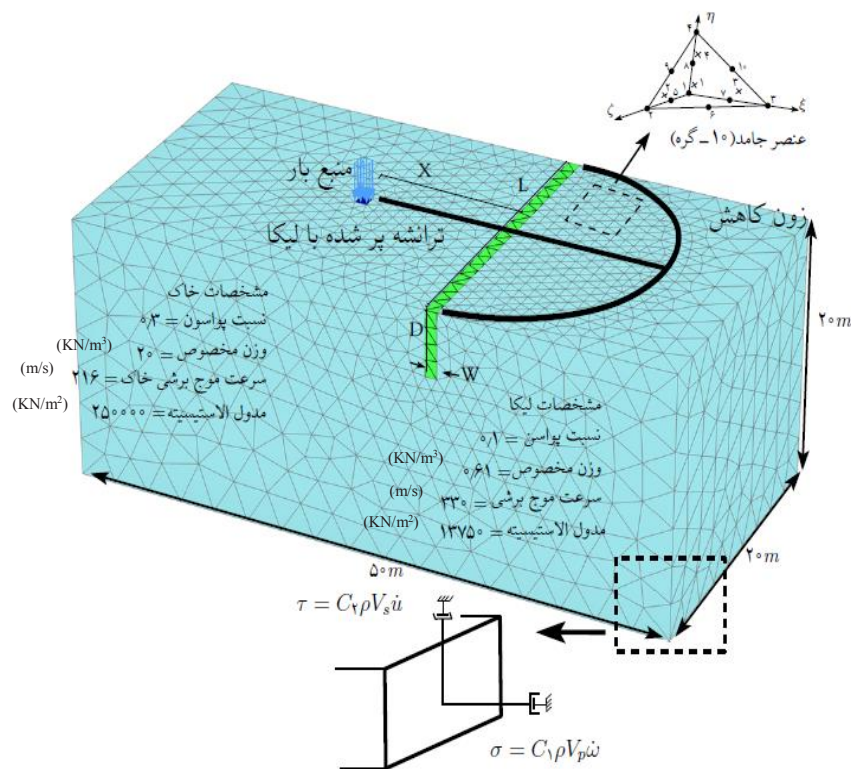


شکل ۱. سیستم‌های مختلف ترانشه، (الف) سیستم تک دیواره (ب) سیستم دو دیواره

Fig. 1. Different trench systems, a) single wall system b) double wall system

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 نحوه انکسار موج در محیط و تداخل امواج در اطراف ترانشه 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 فاصله ای 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، 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 کولمبیر و لیسمر^۲ 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

آن صورت گرفته است. به منظور انجام مقایسه، برای تمامی سیستم‌ها یک مقطع با مساحت کلی یکسان در نظر گرفته شده و عمق‌های استفاده شده در مطالعه پارامتریک برای هر دو سیستم تک دیواره و دو دیواره با هم برابر می‌باشند. 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 $W/2$ می‌باشد. در این قسمت، جهت مطالعه عملکرد ترانشه پر شده با لیکا، از روش عددی اجزاء محدود با مدل‌سازی و صحت‌سنجی در نرم‌افزار پلکسیس^۱ 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 تحلیل‌ها استخراج گردید. از آنجایی که در جهت قائم، ذرات خاک بیشترین جابه‌جایی 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 باتوجه دامنه ارتعاشات کوچک و عدم داشتن تغییرشکل‌های پلاستیک، از مدل الاستیک خطی استفاده گردید [۱۱، ۲۱، ۲۷]. مدل عددی بطور قابل توجهی از امواج گسیل شده از مرزهای مدل تأثیر می‌پذیرد، لذا



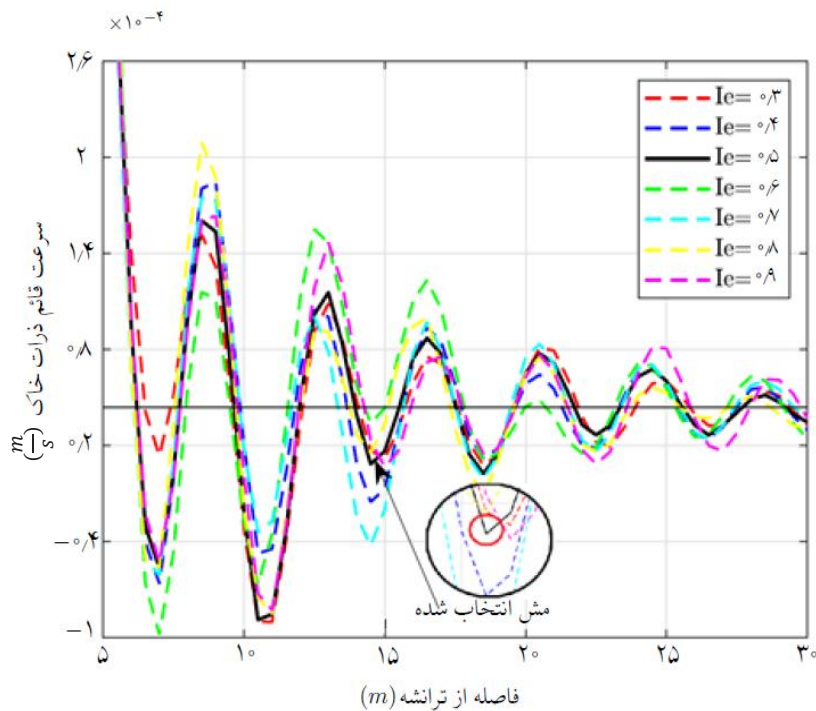
شکل ۲. هندسه مدل در این مطالعه

Fig. 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، مش‌بندی شد. تحلیل حساسیت برای مقایسه اندازه‌های المان‌ها و مش‌بندی برای یک ترانشه پر شده با لیکا در مکانی به فاصله ۵ متر از منبع بار و با طول، عمق و عرض به ترتیب ۱۰، ۵ 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 متعادل ترین نتایج از نظر نمودار قله و دره برای رسیدن به نتایج مطلوب می باشد (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. تغییر پارامترهای موثر بر ترانشه، شمار قابل توجهی سناریوی مدل‌سازی ایجاد می کند، که انجام آن فرآیندی بسیار زمانبر می‌باشد. در نتیجه، به منظور صرفه جویی در زمان محاسبات و همپوشانی این نرم افزار با زبان

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 ترانشه‌ها 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 ترانشه 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 و مدول الاستیسته و همچنین مشخصات خاک شامل: نسبت پواسون، وزن مخصوص، سرعت موج برشی خاک و مدول الاستیسته در مدل‌سازی اعمال گردید.



شکل ۳. تحلیل حساسیت برای مقایسه اندازه مش‌ها

Fig. 3. Sensitivity analysis for mesh size comparison

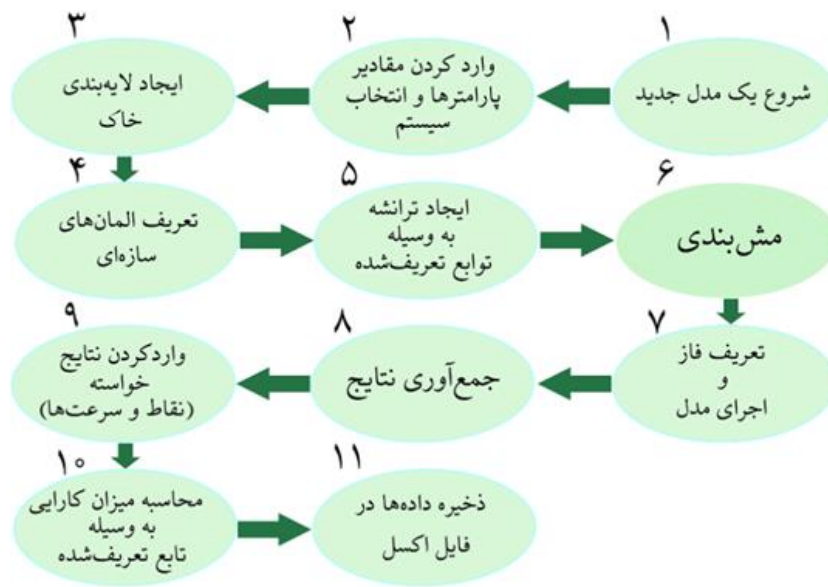
ترین پاسخ سطح زمین قبل و بعد از نصب ترانسه است. در مرحله بعدی، بعد از ایجاد ترانسه در مقابل منبع بار، باز هم میزان جابجایی سطح زمین در نقاط بعد از ترانسه با فواصل ۰/۵ متر اندازه گیری می‌شود و بر مقادیر لرزش سطح زمین قبل از ایجاد ترانسه در همان نقاط اندازه گیری شده تقسیم می‌شود. مقدار فاصله بعد از ترانسه برای اندازه گیری ارتعاش روی سطح زمین در قسمت ۱-۳-۱ و ۱-۳-۲ توضیح داده شده است. در نهایت، برای ارائه مقدار کارایی ترانسه به صورت درصد، از تمام مقادیر میانگین گرفته و در ۱۰۰ ضرب می‌شود (رابطه ۲) [۲۳].

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

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

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 می باشد. ورودی برنامه کامپیوتری، مقادیر پارامترهای مختلف شامل: عمق ترانسه (D)، عرض ترانسه (W)، طول ترانسه (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 ترانسه 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 ترانسه محاسبه شد (گام های ۸ تا ۱۱).

میزان کارایی ترانسه، 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 ترانسه بر قبل از آن می باشد. برای محاسبه میزان کارایی در حالت بدون ترانسه، میزان لرزش سطح زمین از منبع بار به فواصل ۰/۵ متر اندازه گیری می‌شود. دلیل انتخاب این فاصله، ارائه دقیق



شکل ۴. فرایند پیاده سازی مدل عددی ترکیبی Plaxis با Python

Fig. 4. Implementation process of Plaxis hybrid numerical model with Python

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 رایلی نرمال می‌شدند، نیاز بود که میزان طول موج رایلی عدد صحیحی باشد که بتوان به راحتی برای پارامترهای مورد بررسی نیز، اعداد صحیحی استخراج کرد. طول موج رایلی با تقسیم میزان سرعت موج رایلی 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 رایلی برای این مطالعه ۵ متر محاسبه شده است. مشخصات مکانیکی خاک و لیکا استفاده شده در مدل‌سازی عددی در جدول ۲ ارائه شده است.

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.

یکی از مهمترین مراحل مطالعه پارامتریک، اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده می‌باشد. برای این منظور، مدل توسعه یافته در این مقاله، با استفاده از یک مدل عددی، برای یک ترانسه باز شرایط سیستم فعال و غیرفعال اعتبار سنجی می‌شود. برای این هدف، نتایج مقالات کاتیس^۱ و همکاران و الحسینی^۲ برای حالت‌های فعال و غیرفعال انتخاب و خصوصیات خاک و منبع ارتعاش برای هر دو سیستم در جدول ۱ ارائه شده است [۳۰].

شکل های ۵ و ۶ نتایج مقایسه مدل توسعه یافته مطالعه حاضر با نتایج منتشر شده [۳ و ۳۰] را به ترتیب برای یک ایزولاسیون فعال و غیر فعال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود 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 ترانسه پر شده با لیکا را پیش بینی می‌کند.

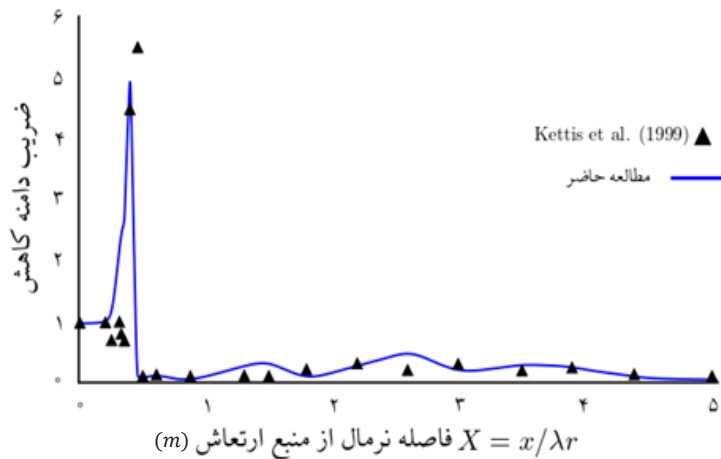
از آنجایی که مطالعات زیادی برای کاهش لرزش سطح زمین در

1 Kattis
2 Ahmad and Al-Hussaini

جدول ۱. خواص سیستم فعال و غیر فعال خاک برای اعتبارسنجی [۳۰، ۳]

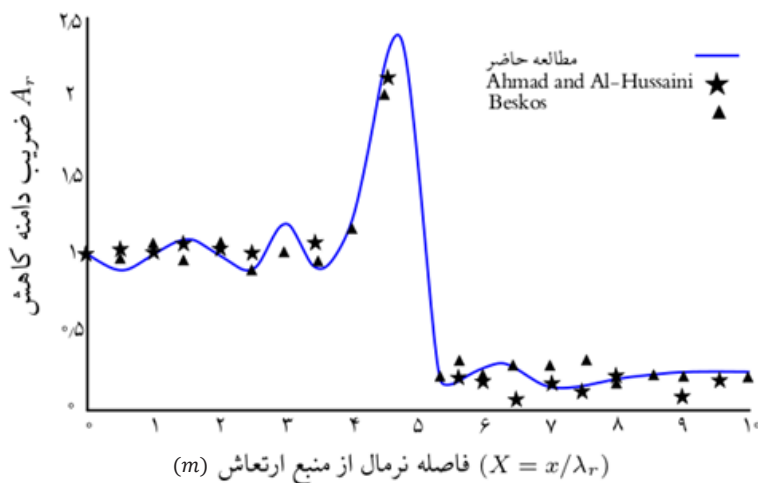
Table 1. Properties of active and passive soil system for validation [3 & 30]

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 ۵. حالت ایزولاسیون فعال: مطالعه مقایسه ای در ایزولاسیون ارتعاش توسط ترانشه باز

Fig. 5. Active isolation mode: a comparative study on vibration isolation by open trench



شکل ۶. حالت ایزولاسیون غیرفعال: مطالعه مقایسه ای در ایزولاسیون ارتعاش توسط ترانشه باز

Fig. 6. Passive Isolation Mode: A Comparative Study in Open Trench Vibration Isolation

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

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

ضریب میرایی رایلی	مدول الاستیسیته (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

۳-۱- 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 ترانشه شامل عمق D (از ۰/۴ تا ۱/۶ متر)، عرض W (از ۰/۰۵ تا ۰/۳ متر) و طول L (از ۰/۵ تا ۴ متر) شروع شد. تمامی پارامترها نسبت به طول موج رایلی، که طول آن ۵ متر بود، نرمال گردید. به منظور محاسبه تاثیر مکان ترانشه بر میزان کارایی ترانشه پر شده با لیکا، سه مکان مختلف شامل ۰/۵، ۱/۲۵ و ۲ متر انتخاب شد. نتایج نشان دادند که میزان کارایی ترانشه در کاهش لرزش سطح زمین با تغییر مکان ترانشه تغییری نمی‌کند، به همین دلیل تنها نتایج مربوط به موقعیت (۰/۵ متر) در ادامه ارائه می‌شود. مقادیر مطالعات پارامتریک بر اساس پیشنهادات مطالعات [۱۱، ۱۳] انتخاب شد.

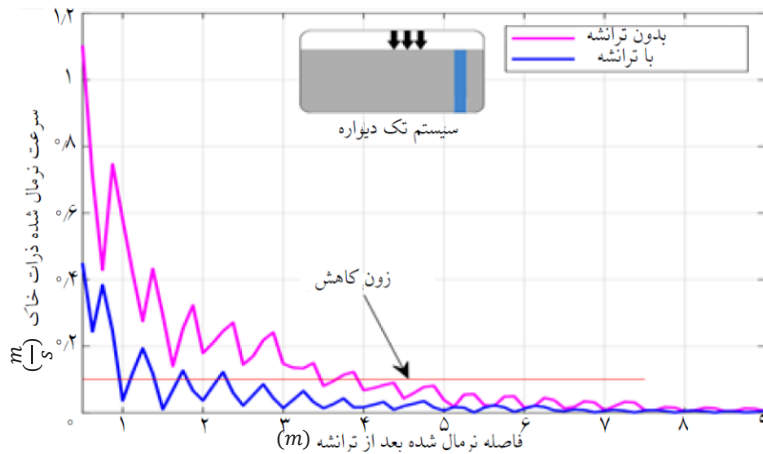
۳-۱-۱- سیستم تک دیواره

سرعت نرمال شده ذرات خاک با و بدون اجرای ترانشه، با یکدیگر مقایسه گردید. ترانشه پر شده با لیکا در مکان ۰/۵ قرار داده شد و عمق نرمال شده ترانشه برابر با ۱ 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 ترانشه، برای سیستم تک دیواره تفاوت چندانی وجود ندارد. بر همین اساس، برای محاسبه \overline{A}_r ، از $7\lambda_r$ به عنوان منطقه زون کاهش استفاده شد. به عبارت دیگر، میزان کارایی ترانشه

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.

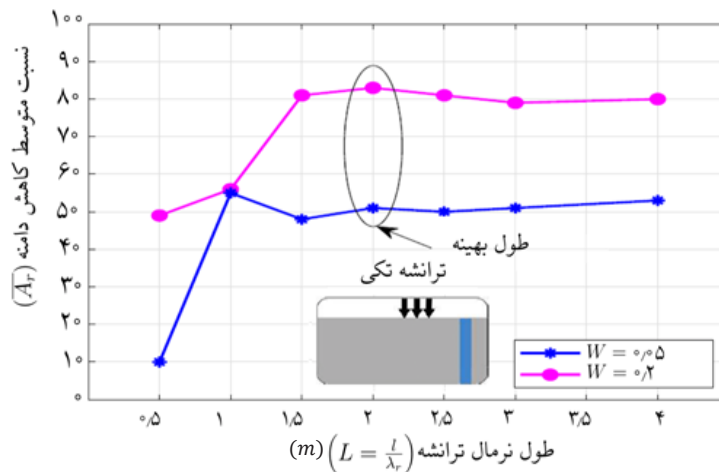
۳- تحلیل و تفسیر نتایج

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 فاصله‌ای 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 رایلی) است.



شکل ۷. میزان جابجایی ذرات خاک در سطح زمین قبل و بعد از ایجاد ترانشه ($D=1\text{ m}$ و $X=0.5\text{ m}$)

Fig. 7. The displacement of soil particles on the surface of the earth before and after creating a trench ($X=0.5\text{ m}$ and $D=1\text{ m}$)



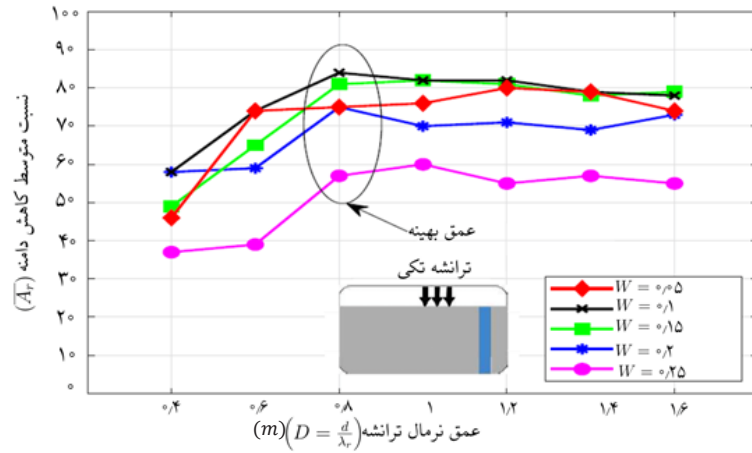
شکل ۸. تاثیر طول نرمال ترانشه روی (\bar{A}_r) برای ($X=1.25\text{ m}$ و $D=1.2\text{ m}$)

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

این موضوع نشان می‌دهد که طول ترانشه، نقش بیشتری برای ترانشه‌های باریک در مقایسه با ترانشه‌های عریض ایفا می‌کند. همچنین، میزان کارایی ترانشه 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

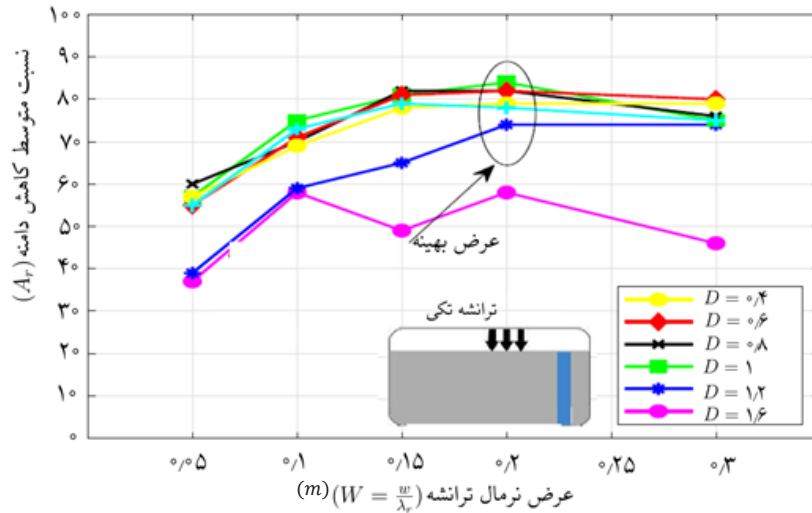
در حین مطالعه پارامتریک برای محاسبه میزان کاهش ارتعاش سطح زمین، همیشه تا فاصله نرمال شده $7\lambda_r$ محاسبه می‌شود. این مقدار برای تمامی سیستم‌های ایزولاسیون در حالت فعال استفاده شده است.

شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش طول نرمال از ۰/۵ تا ۲ متر، \bar{A}_r به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. میزان افزایش کارایی ترانشه برای ترانشه باریک، در حدود ۴٪ و برای ترانشه عریض برابر با ۳۰٪ می‌باشد.



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

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

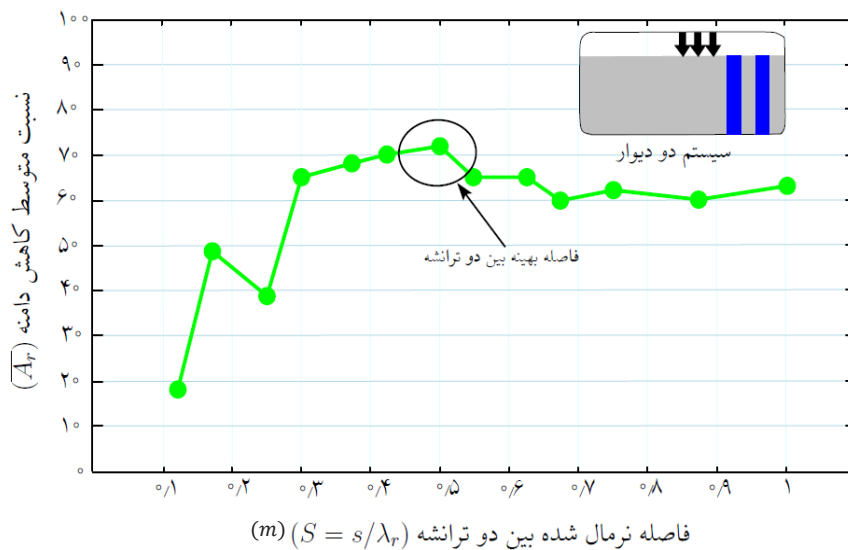


شکل ۱۰. تاثیر عرض نرمال ترانشه روی (\bar{A}_r) برای $(X=0.5$ m)

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

میزان کارایی ترانشه پر شده با لیکا مشاهده نمی‌شود. بنابراین برای مسدود کردن بخش اعظمی از امواج ورودی، عمق نرمال برابر با 0.8 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 ۱۰ نشان می‌دهد که W نقش مهمی در اثر کاهندگی 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

سیستم‌ها برابر با 2 متر انتخاب شد. 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 0.4 به 0.8 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 20% می‌باشد. با افزایش عمق بیش از مقدار 0.8 متر تغییرات قابل توجهی در



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

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

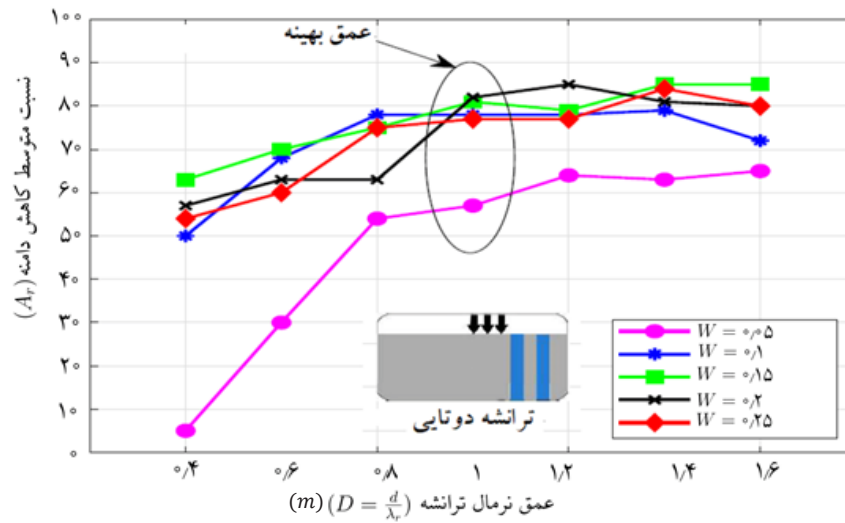
بهترین عملکرد، ترانشه مورد نظر در فاصله ۱/۲۵ متر و با عمق نرمال ۱ متر در مقابل منبع بار در نظر گرفته شد. بر مبنای نتایج مطالعه پارامتریک که در شکل ۱۱ ارائه شده است، مشخص گردید که فاصله نرمال بهینه برابر با ۰/۵ متر می‌باشد. این فاصله در انطباق با یافته‌های مرجع [۱۰] برای فاصله بهینه بین ترانشه‌ها می‌باشد.

همچنین شکل ۱۲ نشان می‌دهد که پارامتر D برای عمق نرمال بین ۰/۴ تا ۱ متر برای تمامی عرض‌ها، در کاهش و دفع امواج موثر می‌باشد. میزان این افزایش کارایی برای ترانشه‌های عریض $(W > 0.1)$ در حدود ۲۰٪ می‌باشد. ولی رفتار ترانشه نازک $(W > 0.05\text{ m})$ کمی نسبت به ترانشه‌های عریض‌تر متفاوت است. برای این ترانشه، روند افزایشی با تغییر عمق ترانشه بین ۰/۴ تا ۱ متر مشاهده می‌شود، ولی این افزایش که حدود ۵۰٪ می‌باشد، در مقایسه با سایر ترانشه‌ها قابل توجه است. عمق بهینه تقریباً برابر با ۱ متر برای تمامی ترانشه‌ها انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با ترانشه‌های عریض‌تر، پارامتر D نقش معنادارتری برای ترانشه‌های باریک‌تر 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. بعلاوه فاصله کوتاه‌تر 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 عریض‌تر

عرض ترانشه از ۰/۵ متر به ۰/۲ متر میزان کارایی ترانشه پر شده با لیکا را در حدود ۳۰٪ برای تمام عمق‌ها افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد در ترانشه‌های خیلی عمیق $(D = 1/6\text{ m})$ ، 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 $(W > 0.2\text{ m})$ ، 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 ناپیوستگی‌های هندسی بیشتر در کناره‌های ترانشه پر شده با لیکا شده و منجر به انکسار بیشتر امواج ورودی می‌گردد.

۳-۱-۲- سیستم دو دیواره

در جایی که اجرای سیستم تک دیواره بعلاوه 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 دیواره برای رسیدن به



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

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

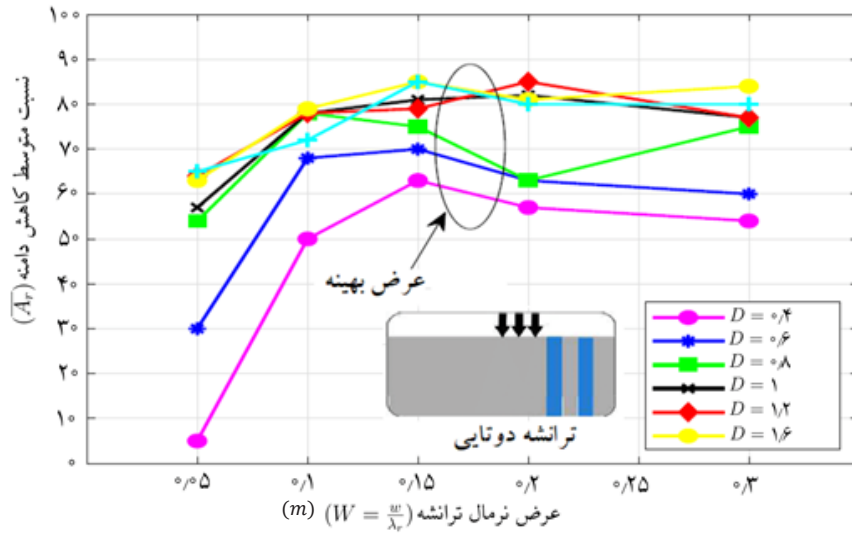
با لیکا بطور ناقص منعکس می‌شود. انرژی موج ریلی با عبور از زیر ترانشه یک موج ریلی جدید بعد از ترانشه می‌سازد. انرژی موج عبوری در ناحیه بعد از ترانشه ارتعاشاتی ایجاد می‌کند. افزایش عرض ترانشه امواج بیشتری را مسدود نموده و منجر به عبور تعداد کمتری از امواج ورودی می‌گردد.

۳-۲- 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 ریلی 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

$(W > 0/05 \text{ m})$ 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.

همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده گردید با افزایش عرض نرمال از $0/05$ تا تقریباً $0/18$ متر کارایی ترانشه به میزان حدوداً ۲۰٪ برای ترانشه‌های عمیق ($D > 0.8 \text{ m}$) افزایش می‌یابد. ولی این افزایش برای ترانشه‌های کم عمق در ازای همان میزان افزایش عرض، تقریباً برابر است با ۵۰٪ 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 ۶۰ تا ۸۰ درصد، عمق بهینه حداقل برابر با ۱ متر نیاز است. بعلاوه، تاثیر W برای موانع با D بزرگتر از ۱ متر کمتر می‌باشد و نمودارهای ترانشه‌های عمیق تر برای رسیدن به عرض بهینه ($0/18$ متر) از نقطه شروع ($W = 0/05 \text{ m}$) با شیب ملایم تری حرکت می‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که تاثیر عرض ترانشه پر شده با لیکا، برای عمق‌های بزرگتر از عمق بهینه ($D = 1 \text{ m}$) کمتر است (شکل ۱۳). بنابر تئوری توسعه داده شده توسط مرجع [۲۹]، انرژی امواج ریلی در ناحیه ای بین سطح زمین و طول موج آن در ناحیه سمت چپ ترانشه پر شده



شکل ۱۳. تاثیر عرض نرمال ترانشه روی (\bar{A}_r) برای $(X=0.5 \text{ m})$

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

منبع ارتعاش می‌گردد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد، با افزایش W از 0.05 تا 0.2 متر برای تمامی اعماق ترانشه افزایشی معادل 30% 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.

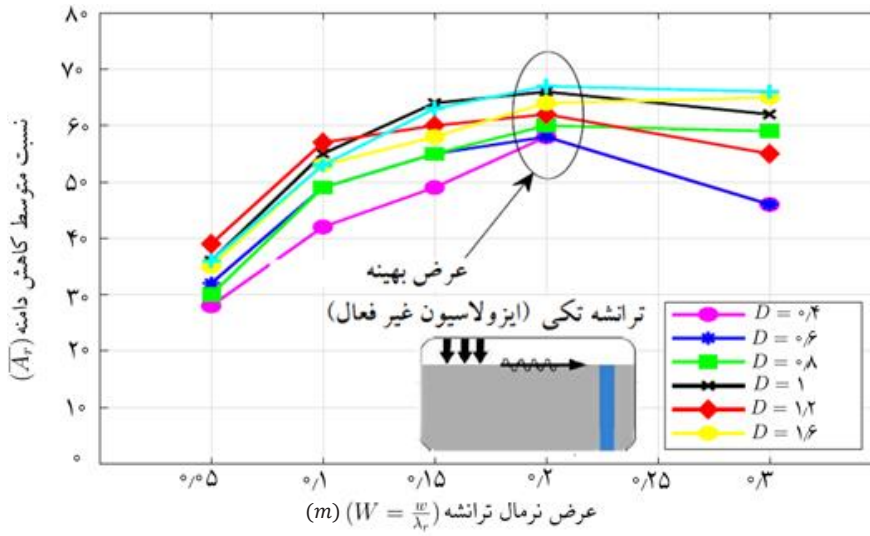
۳-۲-۲- سیستم دو دیواره

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تغییرات عمق ترانشه بر روی \bar{A}_r تاثیری ندارد و حتی افزایش W نیز باعث تغییر نحوه تاثیرگذاری D روی \bar{A}_r نمی‌شود. همچنین، مقایسه شکل ۱۵ با شکل ۱۴ نشان می‌دهد که عمق ترانشه در سیستم دو دیواره حتی تاثیر 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 رایلی 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

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.

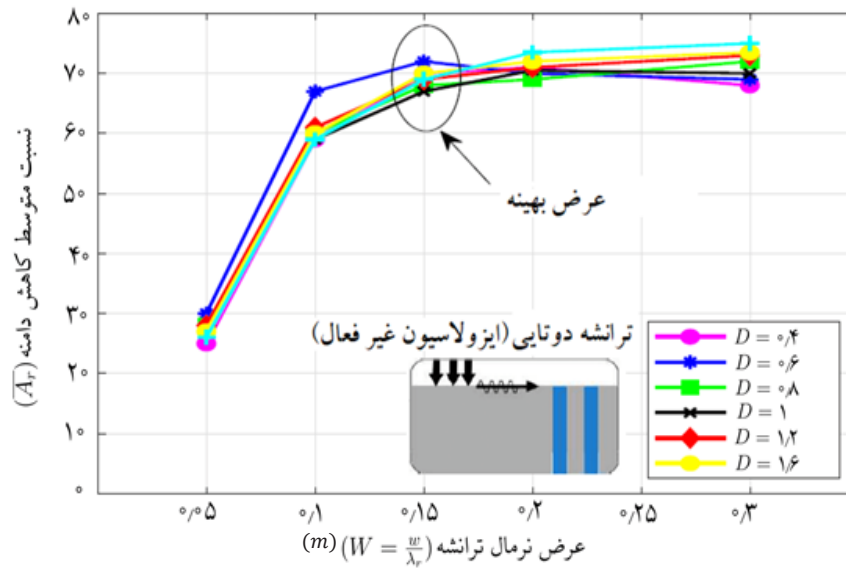
۳-۲-۱- سیستم تک دیواره

در این قسمت فاصله بین ترانشه پر شده با لیکا و منبع بار برابر با 3 متر اتخاذ گردید. کاهش قابل توجهی در جابجایی قائم زمین قبل و بعد از نصب ترانشه پر شده با لیکا با فاصله نرمال 10 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



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

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



شکل ۱۵. تاثیر عرض نرمال ترانشه روی (\bar{A}_r) برای $(X=0.5 \text{ m})$

Fig. 15. The effect of the normal trench width on (\bar{A}_r) for $(X=0.5 \text{ m})$

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 نتیجه‌گیری به دست آمده از این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که مکان ترانشه به عنوان یک فاکتور مؤثر در میزان کارایی ترانشه‌های پر شده با لیکا نقشی بازی نمی‌کند. به بیان دیگر، تغییرات در مکان ترانشه (X)، تأثیر قابل توجهی بر میزان کاهش ارتعاش ایجاد نکرد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که در طراحی ترانشه‌های بهسازی شده با لیکا برای کاهش ارتعاش، مکان قرارگیری ترانشه نسبت به منبع ارتعاش اولویت کمتری دارد و می‌توان بر روی سایر پارامترهای مؤثر مانند عمق، عرض و مشخصات مواد پرکننده تمرکز بیشتری نمود.

منابع

- [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

می‌شوند. در حقیقت انکسار و تبدیل امواج از سطحی به حجمی ناشی از گوشه‌های دو ترانشه در مقایسه با عمق، نقش مهم‌تری در امواج رایلی 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 0.05 متر به 0.15 متر منجر به افزایش کارایی ترانشه در حدود 40% برای همه ی عمق‌ها می‌شود و با افزایش مقدار عرض ($W < 0.15$)، میزان کارایی ترانشه تغییر چشم‌گیری نمی‌کند و تقریباً ثابت می‌ماند.

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 $7\lambda_r$ و $10\lambda_r$ 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 $2\lambda_r$ درنظر 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 درنظر 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

- 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 geofoam 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. Esmaili, 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. Esmaili, 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 geofoam trenches, in: *64rd Canadian Geotechnical Conference*, Toronto, ON, Canada, (2011).
- 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 geofoam-filled trenches, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104 (2018) 228-235.
- [13] E. Çelebi, S. Fırat, 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.
- [14] C. Murillo, L. Thorel, B. Caicedo, Ground vibration isolation with geofoam 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*

- Isolierkörper als Erschütterungsreduktionsmaß nahme (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.
- [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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Dibamehr, F. Behrooz Sarand, R. Vafaipour Sorkhabi, The application of geopolymerization method to modify the yellow marl soil of Tabriz, Amirkabir J. Civil Eng., 56(4) (2024) 477-496.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22872.8062](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22872.8062)

