

بررسی عددی اثر تراکم خاک و عمق ترانشه مانع مقاوم بر کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطار

ابراهیم سعادتنفر^۱، علیرضا اردکانی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱۰/۴]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

چکیده- لرزش‌های ناشی از حرکت قطار از زمان پیدایش سیستم حمل و نقل ریلی، مطرح بوده است. امروزه این موضوع با افزایش سرعت حرکت قطار و وزن واگن‌ها اهمیت بیشتری یافته است. روش‌ها و تکنیک‌های متفاوتی برای کاهش این لرزش‌ها به وسیله افراد مختلف ارائه شده است. یکی از روش‌های حوزه ژئوتکنیک استفاده از ترانشه باز است. در این پژوهش به مدلسازی جداسازهای ژئوتکنیکی به منظور کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطار پرداخته می‌شود. بدین منظور با در نظر گرفتن وزن و فواصل چرخ‌ها، تابع بارگذاری برحسب زمان تعیین شده، با محاسبه طیف فوریه و تعیین محدوده فرکانسی مدنظر، تابع بار-زمان ناشی از حرکت قطار مشخص می‌شود. سپس با مدل سازی اجزا محدود سیستم متشکل از ریل، قطار، تراورس، بالاست و زیر بالاست و لایه خاکی، به تحلیل انتشار موج ناشی از حرکت قطار و بررسی کاهش آن به روش ترانشه مانع پرداخته شده است. بدین منظور با بررسی تغییر شکل‌ها، سرعت ذره و محتوای فرکانسی ارتعاشات در نقاط مورد نظر برای سه نوع خاک دانه‌ای با تراکم مختلف، اثر ترانشه مانع مورد توجه قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با افزایش عمق ترانشه، دامنه ارتعاشات بیشتر کاهش می‌یابد و باعث کاهش دامنه فرکانس غالب موج لرزش می‌شود. همچنین با افزایش عمق ترانشه، از مقادیر پارامتر نسبت کاهش دامنه (Att) کاسته شد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد ترانشه است. از طرفی با تغییر تراکم خاک بستر مشخص شد که این عامل تاثیر محسوسی بر راندمان ترانشه ندارد اما باعث تغییر محتوای فرکانسی ارتعاشات می‌شود. به گونه‌ای که در خاک سست‌تر، دامنه بیشینه، در فرکانس‌های کمتری رخ می‌دهد. در این پژوهش رابطه عمق ترانشه و نسبت کاهش دامنه، به صورت یک تابع درجه دوم ارائه شد. کمینه عمق ترانشه باید به گونه‌ای انتخاب شود که کاهش ایجاد شده، به مقدار قابل توجهی بیشتر از کاهش ناشی از میرایی هندسی و مصالح باشد. اندازه کاهش مورد نیاز برای تخفیف آسیب‌های احتمالی سازه محافظت شده و ملاحظات اقتصادی و اجرایی در تعیین عمق نهایی ترانشه مانع موثر است.

واژگان کلیدی: تابع بار-زمان حرکت قطار، ارتعاش، ترانشه مانع، عمق، تراکم خاک.

۱- مقدمه

لرزش‌ها می‌تواند روی سیستم تاسیسات و یا نازک‌کاری ساختمان‌های مجاور تاثیر گذار باشد. معمولاً محدوده فرکانسی موثر لرزش‌های ناشی از حرکت قطار بر ساختمان‌ها کمتر از ۱۰۰ هرتز است [۱].

تا به امروز پژوهش‌های فراوانی درباره بررسی لرزش‌های ناشی از حرکت قطار انجام شده است. یانگلس (۱۹۷۳) و بتیس (۱۹۷۷)، مدلسازی و شبیه سازی فضای بیکران با استفاده از روش المان نامحدود با به کارگیری فرمولاسیون تابع شکل

امروزه سیستم حمل نقل ریلی در بیشتر کشورها از جمله ایران، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای داشته و خطوط راه‌آهن به بسیاری از مناطق رسیده است. احداث ریل در مناطق مسکونی و در کنار بناهای قدیمی و یا ساختمان‌های با اهمیت زیاد، مشکلاتی را برای مردم عادی و همچنین نگرانی‌هایی برای تعدادی متخصصین فراهم آورده است. نگرانی‌ها به دلیل اثر لرزش ناشی از حرکت قطار روی این سازه‌ها است. این

سطحی به وسیله ترانشه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از: ایزولاسیون فعال (اکتیو)^۱ و ایزولاسیون غیر فعال (پاسیو)^۲. در حالت اول، ترانشه مانع در نزدیکی محل ایجاد تحریک یا بار قرار می‌گیرد، در حالت دوم ترانشه مانع در نزدیکی ساختمانی که می‌خواهد محافظت شود قرار می‌گیرد [۸]. در این پژوهش به بررسی اثر ترانشه در حالت پاسیو (مقاوم) در کاهش انرژی ناشی از لرزش زمین در اثر حرکت قطار پرداخته می‌شود.

۲- ارائه مدل بار قطار

مدل بار قطار با بررسی حرکت واگن‌ها روی ریل برای یک نقطه بصورت تابع نیرو - زمان در نظر گرفته شده است، شکل (۱). در این پژوهش مشخصات وزن واگن و ابعاد در نظر گرفته شده برای واگن و همچنین سرعت قطار در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به پیچیده بودن شکل بار ناشی از چرخ‌ها، فرض می‌کنیم که بار در حد فاصل بین چرخ‌ها مقادیر ثابتی دارد [۱۱]. یعنی برای دو چرخ نزدیک به هم، (X) دارای مقدار ثابت F1 و در فاصله بین دو چرخ دور (X2) مقدار آن صفر است.

جدول (۱) مشخصات واگن جهت مدل سازی بار قطار

Parameter	Symbol	Value	Unit
Wagon length			
Train speed	L :	23	m
The distance between the two wagons	V :	80	km/h
Distance of second axle to third axle	X1 :	0.6	m
	X2 :	20	m
Distance between 2 near axel	X :	1	m
The weight of a wagon with passengers and cargo	W :	100	ton
The force exerted by a wagon wheel	F1 :	122.6	kN

Table 1. Wagon specifications for modeling train load

جابه‌جایی، به وسیله‌ی شکل هندسی محو کننده را بررسی کردند [۳ و ۲]. در مورد ابعاد مجزا سازی در مدل عددی، با استفاده از دامنه‌های فرکانسی در روش المان مرزی، کارهای ارزشمندی به وسیله‌ی دومینگز و روزت (۱۹۷۸) انجام شده است [۴]. کریلف و فرگوسن (۱۹۹۵) و همچنین باربر (۱۹۹۶) از جمله کسانی بودند که به بررسی حل مسئله انتشار امواج با استفاده از روش های تحلیلی پرداخته‌اند [۵ و ۶]. شلبی و کرتل (۲۰۱۳) هم به وسیله‌ی مدل دو بعدی به آنالیز غیرخطی تاثیر مانع بر لرزش‌های ایجاد شده از حرکت قطار پرداخته‌اند [۷].

وودز (۱۹۶۷) از شاخص‌ترین کسانی است که روی مسائل ایزولاسیون پی‌ها با استفاده از ترانشه کار کرده است. او اثر موقعیت و عمق ترانشه را روی کارایی ترانشه مانع به صورت سه بعدی برای ایزولاسیون پی در معرض بار هارمونیک تحت فرکانس مختلف بررسی کرد. همچنین برای تکمیل مطالعات خود دست به یکسری آزمایش‌ها تجربی زد. وودز ابعاد ترانشه را مرتبط با طول موج رایلی می‌دانست [۸].

عوامل بسیاری در ارتعاشات ناشی از حرکت قطار موثر است. این عوامل شامل: فاصله چرخ‌ها، سرعت قطار، وزن واگن (نیروی محوری قائم)، عدم بالانس و زبری چرخ‌ها، شتاب مثبت و منفی قطار، خمیدگی یا انحنای مسیر، سختی و هندسه تراورس، فاصله تراورس است [۹].

به منظور تعیین بار ناشی از حرکت قطار می‌توان با تقریب مناسبی تنها اثر وزن را بررسی کرد [۱۰]. با توجه به مرور ادبیات فنی، استفاده از ترانشه باز در کاهش دامنه لرزش‌های ناشی از حرکت قطار روش کارآمدی است. بدین ترتیب مطالعه تاثیر پارامترهای هندسی ترانشه در میزان کاهش لرزش‌ها اهمیت زیادی پیدا خواهد کرد. در این مقاله با در نظر گرفتن بار قائم دینامیکی (وزن قطار) به وسیله‌ی مدل‌سازی عددی به بررسی اثر عمق ترانشه پرداخته می‌شود. بدین منظور با ارائه مدل دینامیکی بار قطار و اعمال آن روی تراورس بتنی، امواج لرزشی در مدل ایجاد شده و با به کارگیری مانع موج با عمق‌های مختلف به بررسی اثر عمق ترانشه برای کاهش لرزش ناشی از حرکت قطار می‌پردازیم.

برطبق نظریه وودز (۱۹۶۷) مساله ایزولاسیون در مقابل امواج

1 Active
2 Passive

فوریه در فرکانس‌های بالا مقادیر ناچیز و نزدیک صفر دارد، از فرکانس‌های بالا چشم‌پوشی کرده و فرض می‌شود که تابع تبدیل، محدود به فرکانس‌های انتخاب شده است [۱۱].

با استفاده از معکوس تبدیل فوریه تابع بار-زمان اصلاح شده به دست آمد، که نمودار آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

در شکل (۴) نیز طیف توان تابع بار قطار نشان داده شده است تا محتوای فرکانسی بار قطار مدل شده نمایش داده شود با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که در فرکانس بیش از حدود ۱۲ هرتز دامنه فرکانس مقادیر ناچیزی دارد و همچنین فرکانس غالب بار در حدود ۱ هرتز نشان داده شده است.

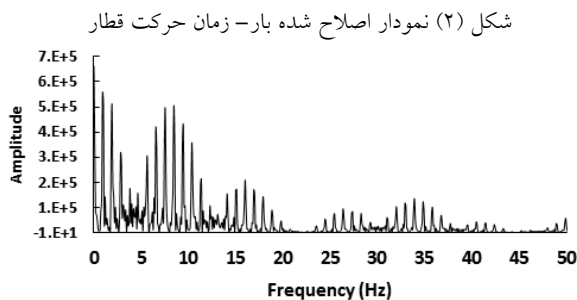


Fig. 2. Fourier spectrum of train movement dynamic load function

شکل (۳) نمودار طیف توان تابع بار در برابر فرکانس حرکت قطار

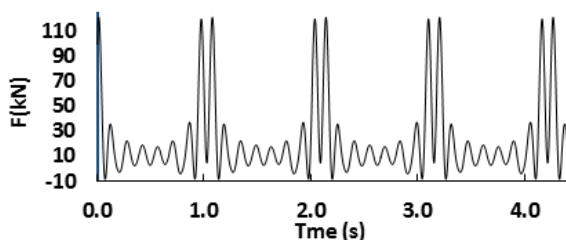


Fig. 3. Corrected load-time Diagram of train movement

شکل (۴) نمودار طیف توان تابع بار در برابر فرکانس حرکت قطار

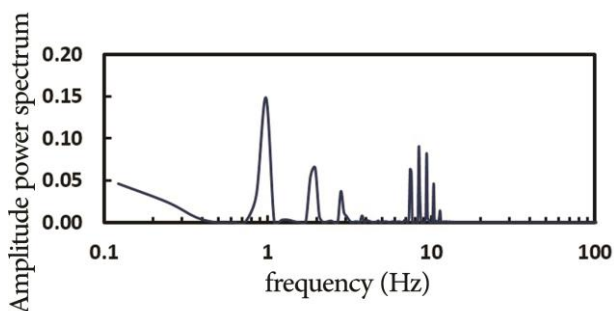


Fig. 4. Amplitude power spectrum of the load function versus the frequency

شکل (۱) تصویر شماتیک واگن برای تشکیل تابع بار-زمان

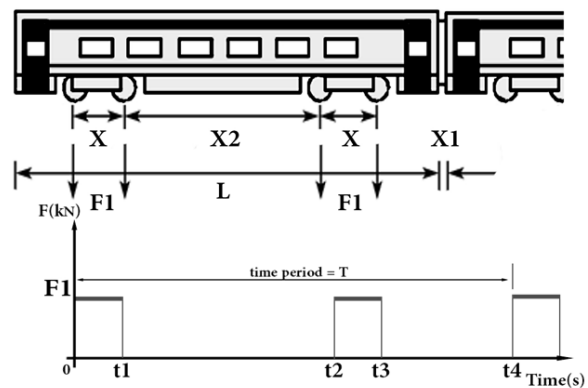


Fig. 1. Wagon schematic illustration of the load-time function

با توجه به شکل (۱) و داده‌های جدول (۱)، تابع بار-زمان به صورت یک تابع خطی چند ضابطه‌ای تشکیل شد، رابطه (۱).

$$f(t) = \begin{cases} F1 & 0 < t \leq t1 \\ 0 & t1 < t \leq t2 \\ F1 & t2 < t \leq t3 \\ 0 & t3 < t \leq t4 \end{cases} \quad (1)$$

با مشاهده شکل (۱)، تابع بار را می‌توان به صورت یک تابع متناوب با دوره تناوب $T=t4$ در نظر گرفت و آنرا به صورت ترکیبی از توابع سینوسی و کسینوسی نوشت. اصطلاحاً به این فرم، نمایش فوریه تابع گویند [۱۲]، رابطه (۲).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2n\pi t/T) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2n\pi t/T). \quad (2)$$

a_0 و a_n و b_n که ضرایب سری فوریه است، نیز قابل محاسبه هستند. هر یک از ضرایب فوریه انرژی یا سهم آن هارمونیک را بیان می‌کنند. برای انتخاب فرکانس‌های موثر در معادله بار-زمان و قضاوت روی آنها باید از تبدیل فوریه استفاده شود [۱۰]، رابطه (۳).

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega \cdot t} dt \quad (3)$$

با ترسیم تابع تبدیل فوریه مشخصه‌های مهمی از تابع بار-زمان اولیه به دست می‌آید. مقادیر مربوط به هر فرکانس میزان انرژی آن هارمونیک را در جملات سری فوریه نشان می‌دهد. مطابق شکل (۲) تابع بار در فرکانس‌های پایین‌تر دامنه بیشتری دارد و ضرایب سری فوریه در جمله‌های اولیه بیشترین سهم را در انرژی هارمونیک طیف دارد [۱۳]. از آنجایی که طیف دامنه

۳- مدلسازی عددی

۱-۳- مشخصات مصالح

از آنجایی که یکی از اهداف این پژوهش بررسی اثر تراکم خاک محل بر میزان ارتعاشات و کارایی ترانشه است، سه نوع خاک بستر S1، S2 و S3 برای مدلسازی در نظر گرفته شده است. مطابق جدول (۲) هر سه نوع خاک به صورت دانه‌ای و فاقد چسبندگی فرض شده است که با افزایش وزن مخصوص، میزان زاویه اصطکاک و مدول ارتجاعی آن افزایش یافته است. روی بستر خاک، لایه زیربالاست به ضخامت ۵۰ سانتی‌متر و یک لایه بالاست به همان ضخامت روی آن قرار دارد. روی لایه بالاست، تراورس (قطعات بتنی مسلح) قرار گرفته است. ابعاد و شیب طرفین لایه‌های توصیف شده مطابق یک نمونه از مرجع [۱۴] انتخاب شد. مشخصات مصالح مطابق جدول (۲) ارائه شده است. در شکل (۵) نیز چگونگی قرارگیری لایه‌های مدل نشان داده شده است.

۲-۳- هندسه مدل

در این بررسی مطابق شکل (۵)، از مدل عددی به صورت

شکل (۵) لایه بندی و مدل سازی و مش بندی انجام شده در نرم افزار

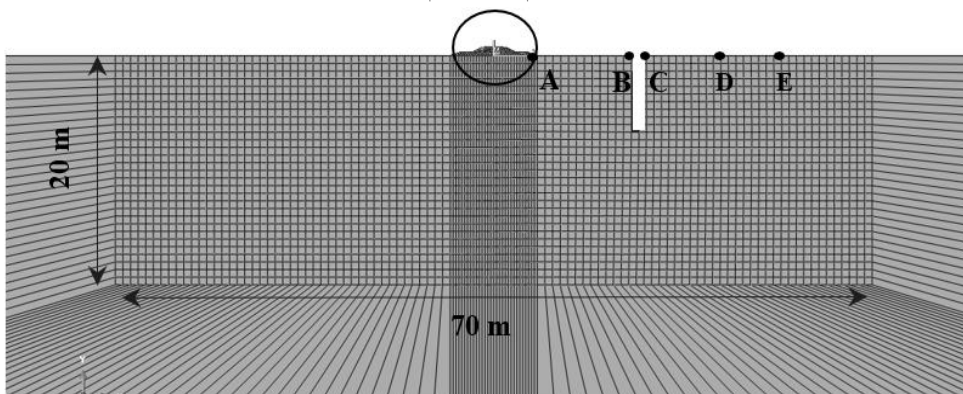


Figure 5. Layering, modeling and meshing on software

ترسیم شکل هندسی المان در اطراف مدل به گونه‌ای است که القا کننده فضای بی‌انتهای است. برای این منظور از تک المان مستطیلی در طرفین مدل استفاده شود. طول مستطیل در حدود نصف بعد مدل در آن راستا باید باشد. نوع المان در نظر گرفته شده برای مرزها CINPE4 است. از ابعاد مش بندی ریزتر در

۳-۳- جزئیات مدلسازی

برای مدلسازی محیط خاکی از المان مربعی ۴ گره‌ای به نام المان CPE4R استفاده شده است. که با تکنیک structured مش زده شده است. برای جلوگیری از انعکاس امواج در مرزها، از المان نیمه بینهایت در مرزهای سیستم استفاده شد.

محل‌های نزدیک به محل اثر بار، استفاده شده است.

جدول (۲) مشخصات مصالح برای مدل‌سازی

Parameter	Ballast	Sub-ballast	Soil1: S1	Soil2: S2	Soil3: S3	sleeper
Density (kN/m ³)	21	20	17	18	19	25
Elasticity modulus (MPa)	300	250	25	40	60	21000
Poisson ratio	0.35	0.35	0.3	0.3	0.3	0.2
Cohesion (kPa)	0.001	0.001	1	1	1	-
Angle of friction (°)	45	43	30	34	38	-

Table 2. Material specifications for modeling

با در اختیار داشتن فرکانس زاویه‌ای طبیعی ω_i ، از تحلیل مودال و با فرض نسبت میرایی ξ_i ، برابر ۵ درصد، ضرایب آلفا و بتا بدست خواهد آمد.

$$\alpha + \beta \omega^2 = 2 \omega_i \xi_i \quad (۷)$$

فرکانس طبیعی خاک برای مدهای اول و دوم، با انجام تحلیل مودال در نرم افزار آباکوس برای مدهای اصلی مدل بدست آمد.

ضرایب میرایی رایلی خاک بستر بصورت، α برابر ۰/۳۵۷ تا ۰/۵۲۳ و β برابر ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۴ محاسبه شد و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۴- تحلیل نتایج

به منظور تحلیل نتایج در مورد اهداف استفاده از ترانشه، بایستی درباره ماهیت امواج سد شده اطلاعات بیشتری ارائه شود. در حدود ۶۷ درصد از کل انرژی موج، توسط موج سطحی (موج رایلی) منتقل می‌شود [۱۷]. امواج منتقل شده در خاک در فواصل نزدیک بیشتر بصورت امواج حجمی خود را نشان می‌دهند و در فواصل دورتر امواج رایلی موثرتر هستند. این امواج در محدوده نزدیک سطح زمین منتشر می‌شوند. کارایی ترانشه مانع موج در حالت مقاوم، بطور مستقیم مرتبط با محدود کردن انرژی موج رایلی است [۱۸].

برای بررسی اثر حضور ترانشه، میتوان پارامترهای تغییر مکان، حداکثر سرعت ذره (PPV^1) و حداکثر شتاب ذره (PPA^2) و همچنین تغییرات تابع طیف توان در برابر فرکانس را در حضور و در غیاب ترانشه مانع، مورد بررسی قرار داد. معمولا مبنای سنجش ارتعاشات حاصل از حرکت قطار که قابل اندازه گیری است، سرعت یا شتاب ذره می‌باشد که در واحد متر بر ثانیه برای سرعت و متر بر مجذور ثانیه برای شتاب بیان می‌شود [۱].

۴-۱- اثر میرایی هندسی و مصالح

ابتدا تغییر شکل‌های ناشی از حرکت قطار در نقاط A، C و D بدون حضور ترانشه برای خاک ۱ بررسی شد. در شکل ۶-

بطور کلی برای انتقال مناسب امواج دینامیکی در شبکه المان‌های مدل، ابعاد المان‌ها باید کمتر از یک پنجم طول موج بار وارد شده باشد، رابطه‌های (۴ و ۵). در حقیقت اندازه مش‌ها با کوچکترین طول موج تابع بار ورودی کنترل می‌شود [۱۵].

$$L_{\max} = \left(\frac{1}{5}\right) \lambda_{R \min} \quad (۴)$$

$$\lambda_{R \min} = \frac{V_s}{f_{\max}} \quad (۵)$$

در این رابطه $\lambda_{R \min}$ طول موج بار است که دارای بیشترین فرکانس است. V_s و $f_{\max}$ نیز به ترتیب سرعت موج برشی در مدل و بیشینه فرکانس بار وارد شده است. از میرایی رایلی در مدل استفاده شد. فرمولاسیون میرایی رایلی در رابطه ۶ ارائه شده است.

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (۶)$$

ماتریس میرایی [C] به وسیله‌ی ماتریس سختی [K] و ماتریس جرم [M] و ضرایب رایلی تعریف می‌شود. که آلفا (α) و بتا (β) ضرایب میرایی رایلی است.

طبق رابطه (۷)، ضرایب میرایی رایلی به نسبت میرایی مصالح (ξ_i) وابسته‌اند [۱۶]. ضرایب میرایی رایلی وابسته به فرکانس است. می‌توان مقادیر ضرایب میرایی رایلی را برای یک سیستم چند درجه آزادی در هر مد نوسانی با استفاده از رابطه (۷) محاسبه کرد [۱۶].

1 peak particle velocity

2 peak particle acceleration

در زمان ۳/۲۷ ثانیه، با حضور ترانشه به ارتفاع ۱ متر، حدود ۶۰ درصد کاهش در دامنه سرعت در مقایسه با حالت بدون ترانشه نتیجه شد.

این عامل ناشی از این موضوع است که حضور ترانشه باز در خاک بدلیل قرار گرفتن در مسیر حرکت امواج سطحی و حجی باعث می شود که انقطاعی در این مسیر حاصل شود و بخشی از این امواج (به خصوص امواج سطحی) سد شوند.

شکل (۷) سرعت ذره در نقطه D در حضور و بدون حضور ترانشه برای

خاک S3

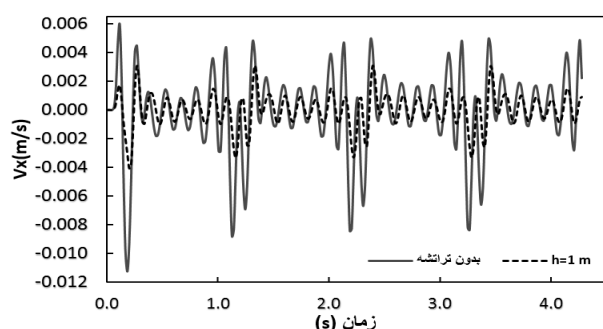


Fig. 7. Particle velocity at D with and without trench for soil S3

در شکل (۸) نمودار سرعت افقی ذره (V_x) در نقطه D در حضور ترانشه‌های با ارتفاع مختلف برای خاک S3 نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۸)، مشخص است که تغییرات ارتفاع ترانشه باز، در تخفیف دامنه سرعت ذره در نقاط بعد از ترانشه موثر است.

با توجه به شکل (۶-الف)، در تغییر شکل قائم نقطه D به نسبت نقطه A و C کاهش دامنه مشاهده شد. بدون حضور ترانشه با فاصله گرفتن از خط مرکزی مدل (محل اعمال بار قطار) تغییر شکل‌ها کاهش یافته و این ناشی از میرایی هندسی و میرایی مصالح (میرایی رایلی) در خاک است.

در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود با افزایش مشخصه‌های مقاومتی خاک، تغییر شکل‌ها کاهش پیدا می‌کند.

به عنوان نمونه، با افزایش ارتفاع ترانشه مانع از ۴ متر به ۸ متر، سرعت افقی ذره ۴۳ درصد بیشتر کاهش می‌یابد. کاهش دامنه لرزش‌ها برای ترانشه به عمق ۸ متر بیشترین مقدار دارد.

الف) نتایج تغییر شکل‌های قائم در این نقاط ارائه شده و در شکل (۶-ب) مقایسه بین سه نوع خاک در نقطه A ارائه شده است.

شکل (۶) الف- تغییر شکل‌های نقاط A، C و D بدون حضور ترانشه برای خاک ۱، ب- تغییر شکل نقطه A برای خاک‌های S1، S2 و S3.

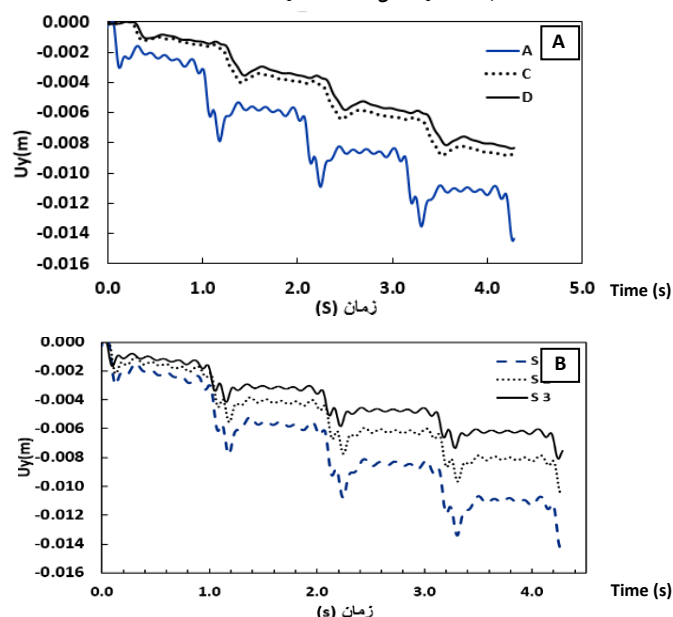


Fig. 6. A) Soil displacement of points A, C and D without trench
B) Displacement of point A for soils S1, S2 and S3

لازم به گفتن است که میرایی هندسی با توجه به مواجهه جبهه موج با حجم بیشتری از مصالح خاکی، با دور شدن از محل اثر بار تعریف می‌شود. که به همین ترتیب کاهش چگالی موج را نتیجه می‌دهد و در پی آن دامنه تغییر شکل‌ها کاهش خواهد یافت [۱۹].

۴-۲- اثر حضور ترانشه با عمق مختلف

۴-۲-۱- نقاط بعد از ترانشه

در شکل (۷) نمودار سرعت افقی ذره (V_x) در نقطه D در حضور ترانشه و بدون حضور ترانشه برای خاک S3 نمایش داده شده است.

حضور ترانشه در خاک، کاهش دامنه سرعت ذره را در نقاط بعد از ترانشه باعث شده است. حتی در ترانشه با عمق کم، کاهش در پاسخ زمین مشاهده شد. به طور نمونه در نقطه D و

افزایش دامنه در پشت ترانشه می‌تواند ناشی از بازتاب موج لرزشی در مرز ترانشه- خاک باشد.

در شکل (۱۰) نمودار سرعت قائم ذره (V_y) در نقطه B در حضور ترانشه‌های با ارتفاع ۱، ۴ و ۸ متر برای خاک S3 نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۱۰)، افزایش در عمق ترانشه، باعث افزایش در دامنه سرعت ذرات در پشت ترانشه می‌شود. با دقت در کادر بزرگنمایی شده، در شکل (۱۰-ب) افزایش دامنه در فاصله قبل از ترانشه برای ترانشه عمیق به نسبت ترانشه با عمق کمتر کاملاً مشهود است.

شکل (۱۰) الف- سرعت ذره V_y در نقطه B در حضور ترانشه با عمق های مختلف خاک S3 ب- کادر بزرگنمایی شده نمودار

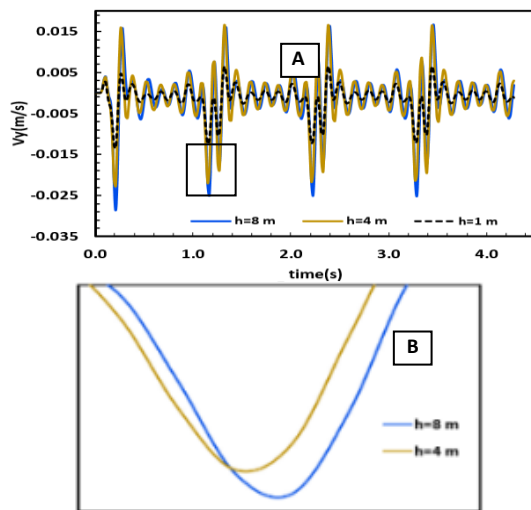


Fig. 10. A) Particle velocity V_y at point B with trench by different depth for soil S3 B) magnified diagram

۴-۲-۲- تاثیر نوع خاک در مقدار جابجایی ها

نتایج تحلیل‌های انجام شده برای ۳ نوع خاک در این بخش ارائه شده است.

با توجه به شکل (۶-ب) همانطور که اشاره شد، تغییر در نوع خاک محل باعث تغییر میزان تغییر مکان‌های ایجاد شده در سطح زمین می‌شود و با ضعیف شدن مشخصه‌های مکانیکی خاک، فرکانس طبیعی خاک کاهش یافته و لرزش‌های بوجود آمده در سطح در فواصل مختلف افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۱) لرزش‌های سطح زمین با حضور ترانشه در خاک در یک نقطه قبل از ترانشه (نقطه A) و یک نقطه بعد از ترانشه (نقطه D) نشان داده شده است.

شکل (۸) سرعت ذره در نقطه D در حضور ترانشه با عمق‌های مختلف

برای خاک S3

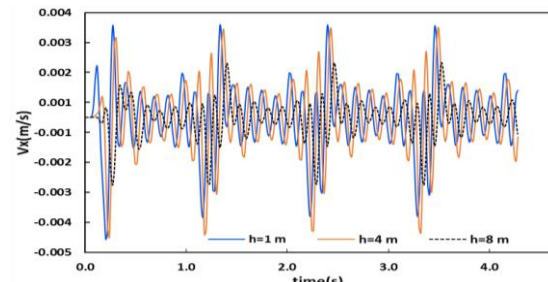


Fig. 8. Particle velocity at D with trench for soil S3 with different depths

بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق ترانشه، کاهش دامنه لرزش‌ها در نقاط بعد از ترانشه حاصل خواهد شد. دلیل آن را می‌توان ناشی از سد کردن بیشتر امواج سطحی به وسیله ترانشه‌های عمیق‌تر دانست و همچنین از رسیدن بخشی از امواج حجمی که امکان گذر از زیر ترانشه به محل مورد بررسی را دارد با افزایش عمق ترانشه، جلوگیری می‌شود.

۴-۲-۲- نقاط قبل از ترانشه

در شکل (۹) نمودار سرعت افقی ذره (V_x) در نقطه A در حضور ترانشه و بدون حضور ترانشه نمایش داده شده است. در نقاط قبل از ترانشه (نقاط A و B)، برای مقادیر V_x در حضور ترانشه افزایش دامنه مشاهده شد. در نقاط نزدیک ترانشه (نقطه B) مقدار این افزایش بیشتر است (در حدود ۲۱٪)، و در نقاط دورتر از ترانشه (نقطه A) افزایش کمتری مشاهده شد، (کادر بزرگنمایی شده، شکل (۹)).

شکل (۹) سرعت ذره V_x در نقطه A با ترانشه و بدون ترانشه برای خاک

S3

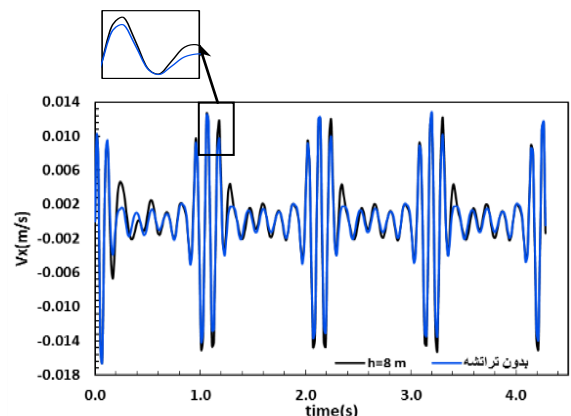


Fig. 9. Particle velocity V_x at A with and without trench for soil S3

در شکل (۱۲) نیز سرعت ذره قائم ذره برای سه نوع خاک ارائه شده است. کاهش دامنه سرعت در این نمودار نیز مشهود است.

۴-۳- جابه جایی نرمالیزه شده

برای ترانسه با عمق های ۱، ۴ و ۸ متر مقدار تاریخچه زمانی نرمالیزه شده جابه جایی در نقطه C نسبت به نقطه B برای خاک ۳ و ۲ در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. هر چه مقادیر این نمودار کمتر باشند، میزان تخفیف دامنه موج بیشتر خواهد بود. همانطور که مشاهده می شود، کمترین مقادیر برای عمق ۸ متر، به دست آمد، که نشان دهنده توانایی ترانسه عمیق تر در سد کردن بیشتر امواج لرزشی است.

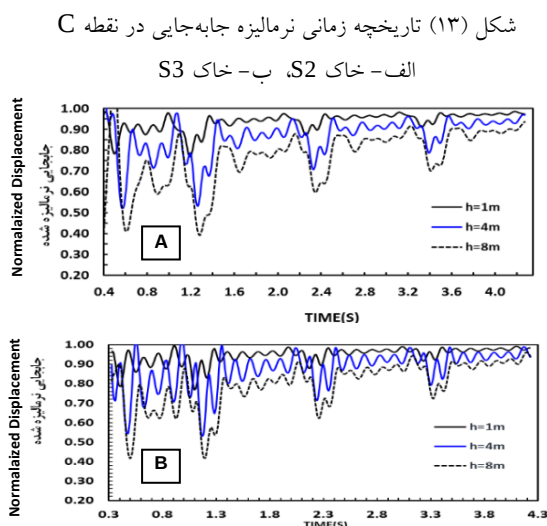


Fig.13. Normalized displacement time history at C
A) Soil S2 B) soil S3

۴-۴- بررسی پارامتر Arr

از موارد دیگری که امکان بررسی کارایی ترانسه را فراهم می نماید، استفاده از پارامتر نسبت کاهش دامنه (Arr^1) است. طبق تعریف نسبت کاهش دامنه مطابق رابطه (۸) ارائه می شود:

$$Arr = \frac{\text{دامنه جابه جایی زمین در حضور ترانسه}}{\text{دامنه جابه جایی زمین بدون حضور ترانسه}} \quad (8)$$

در شکل (۱۴) برای ترانسه های با عمق متفاوت پارامتر Arr در

شکل (۱۱)- الف- سرعت ذره V_x برای سه نوع خاک در حضور ترانسه

با عمق ۸ متر در نقطه A

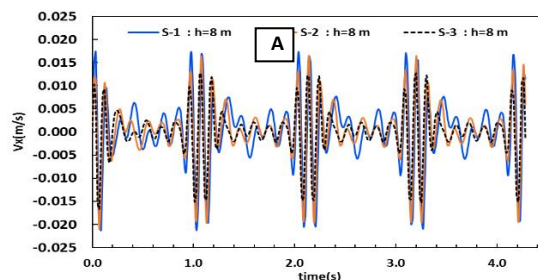


Fig. 11. A) Particle velocity V_x for 3 type of soil with 8 m trench at point A

شکل (۱۱)- الف- سرعت ذره V_x برای سه نوع خاک در حضور ترانسه

با عمق ۱ متر در نقطه A

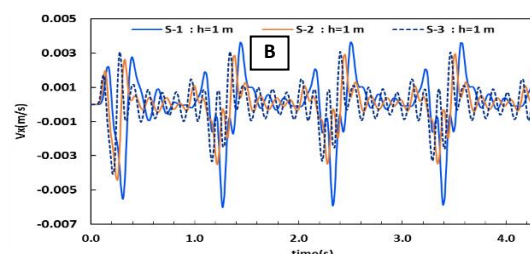


Fig. 11. B) Particle velocity V_x for 3 type of soil with 1 m trench at point D

با دقت در شکل (۱۱) مشاهده می شود که حضور ترانسه در خاک باعث کاهش دامنه تغییر شکل ها در سطح می شود، و نوع خاک نیز در میزان کاهش بوجود آمده موثر است. در خاک S3 به دلیل بالا بودن مقدار مدول ارتجاعی و پارامترهای مقاومتی به نسبت خاک S1، V_x مقادیر کمتری را به خود اختصاص داده است.

به عنوان نمونه با تغییر خاک نوع S1 به نوع S3 در حضور ترانسه ۸ متری در حدود ۲۲ درصد کاهش در دامنه بیشینه سرعت ذره مشاهده شد.

شکل (۱۲)- سرعت ذره V_y ، سه نوع خاک در حضور ترانسه ۸ متری

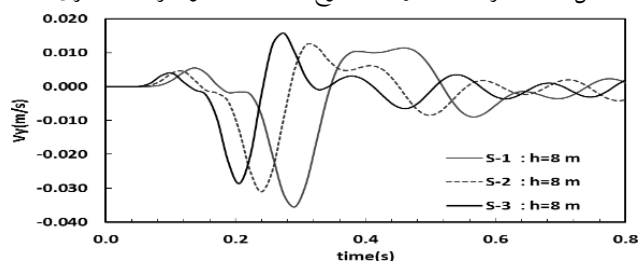


Fig. 12. Particle velocity V_y for 3 type of soil with 8 m trench

۴۱ درصد مشاهده شد. اما برای خاک S1 افزایش عمق ترانشه، باعث افزایش ۲۳ درصدی دامنه فرکانس غالب می‌شود. نکته دیگر این است که با تغییر نوع خاک از S1 به S3 دامنه ماکزیمم جابه‌جا شده و در فرکانس‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. کارایی فیلتراسیون فرکانسی، برای استفاده در ماشین‌آلات و یا بعضی از سازه‌ها است. به این صورت که می‌توان با قرار دادن ترانشه مناسب، با ابعاد مشخص، دامنه فرکانس‌های نامناسب برای آنها را کاهش داده و با این روش سازه و ماشین‌آلات گفته شده محافظت خواهد شد.

شکل (۱۵) مقایسه نمودار طیف توان در برابر فرکانس در حضور ترانشه با عمق ۱ و ۸ متر در نقطه D برای خاک‌های S1، S2 و S3.

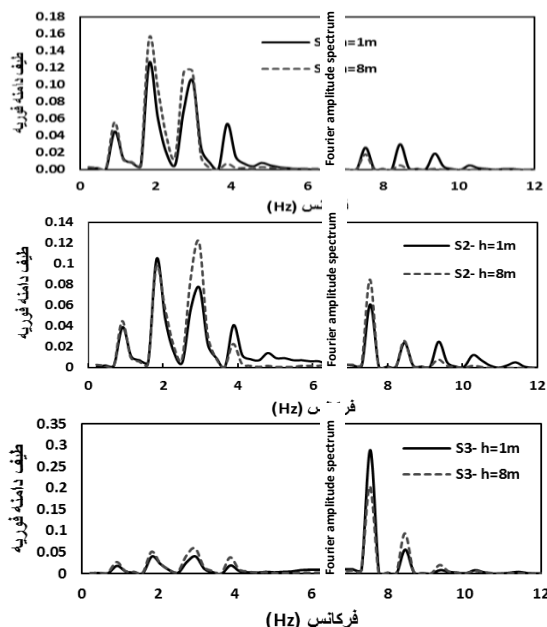


Fig. 15. Compare the power spectrum against frequency with trenches at the depths of 1m and 8m,

۴-۶- بررسی کمینه عمق مناسب ترانشه

برای تعیین کمینه عمق مناسب از پارامتر بیشینه سرعت ذره (PPV) در نقاط A، B، C، D و E استفاده شد که در شکل‌های (۱۶ و ۱۷) نتایج به دست آمده برای خاک S3 مشاهده می‌شود. در شکل (۱۶) بیشینه سرعت ذره را برای ترانشه با سه عمق ۱، ۴ و ۸ متر ارائه شده است. با توجه به شکل، حضور ترانشه در حالت مقاوم (پاسیو)، زمانی بیشترین کارایی را دارد که نزدیکترین فاصله به ساختمان محافظت شده را داشته باشد زیرا دسته امواج سطحی در یک باند ارتفاعی در پروفیل خاک منتشر

نقطه C برای ۲ نوع خاک نمایش داده شده است. در این شکل کمترین مقدار Arr برای ترانشه با عمق ۱۰ متری برابر ۰/۹۳ به دست آمد. این رخداد ناشی از سد کردن هرچه بیشتر امواج سطحی به وسیله ترانشه با عمق بیشتر است که تعداد بیشتری از دسته امواج را مانع می‌شود و امواج کمتری امکان گذر از زیر ترانشه را پیدا می‌کنند. با توجه به شکل (۱۴)، می‌توان خط برازش پارامتر Arr برای ترانشه با عمق‌های مختلف را ترسیم کرد. با ارائه فرمول تغییر مقادیر Arr در برابر عمق ترانشه، این رابطه به صورت یک تابع درجه دوم پیشنهاد می‌شود.

شکل (۱۴) مقایسه مقدار Arr برای ترانشه‌های با عمق مختلف در نقطه C

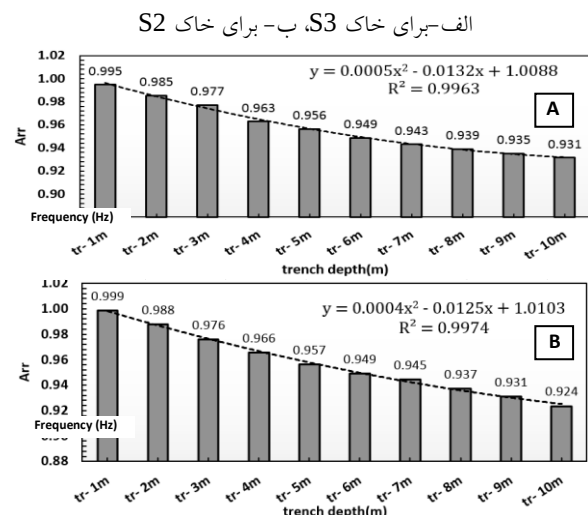


Fig. 14. Compare the value of Arr for trenches with different depths, point C

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که تاثیر خاک بر پارامتر Arr خیلی محسوس نیست.

۴-۵- بررسی محتوای فرکانسی لرزش‌ها

در این بخش، بررسی تاثیر ترانشه بر محتوای فرکانسی موج لرزش ایجاد شده در خاک در اثر حرکت قطار بررسی انجام شد. (شکل ۱۵) نمودار طیف توان سرعت (Vx) در برابر فرکانس را در دو حالت ترانشه با عمق ۱ و ۸ متر در نقطه D برای سه نوع خاک نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که برای خاک S3 افزایش عمق ترانشه، دامنه فرکانس غالب را کاهش داده و افزایش کمی در دیگر فرکانس‌ها، باعث شده است. کاهش دامنه فرکانس غالب در نقطه پیک در حدود

ترانشه باز می‌باشد که در ترانشه‌های با عمق ۴ و ۸ متر این تخفیف دامنه زیاده‌تر و در ترانشه با عمق ۱ متر مقدار تخفیف دامنه کمتر است. نکته مهم در توجیه استفاده از ترانشه این است که باید بررسی شود کاهش دامنه در حضور ترانشه به مراتب بیشتر از کاهش ناشی از میرایی مصالح زمین در غیاب ترانشه باشد.

در شکل (۱۶) این کاهش برای اعماق ترانشه ۴ و ۸ متر مناسب به نظر می‌رسد. برای بررسی بیشتر در شکل (۱۷) ترانشه در اعماق ۲ و ۳ و ۴ متر برای خاک S3 به صورت مجزا مورد توجه قرار گرفت. در شکل (۱۷) دایره‌ای حول فضای ترانشه کشیده شده که در شکل (۱۸) این قسمت برای بررسی دقیق‌تر، جداگانه ترسیم شده است.

می‌شوند. امواجی که در فاصله بیشتری از سطح زمین درون خاک منتشر شده‌اند از زیر ترانشه‌های کوتاه‌تر عبور کرده و در فواصل دورتر از ترانشه به سطح زمین نزدیک می‌شوند و امکان رسیدن به ساختمان فرضی را پیدا می‌کنند. در صورتی که ترانشه به ساختمان نزدیک باشد شانس رسیدن امواج به آن کاهش پیدا کرده و با توجه به اینکه ترانشه امواج نزدیک‌تر به سطح را در محدوده ارتفاعی خود سد می‌کند، در نتیجه آشفته‌گی ایجاد شده در محیط در نقطه مورد نظر کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل (۱۶) مشخص است بین نقاط A تا B و C تا E نمودار دارای شیب کاهشی است که به معنای وجود میرایی در محیط خاکی است. در فاصله بین نقاط B و C با کاهش بیشتری مواجه می‌شویم که ناشی از اثر سد کنندگی

شکل (۱۶) نمودار حداکثر سرعت ذره برای اعماق ترانشه ۱، ۴ و ۸ متری - خاک S3

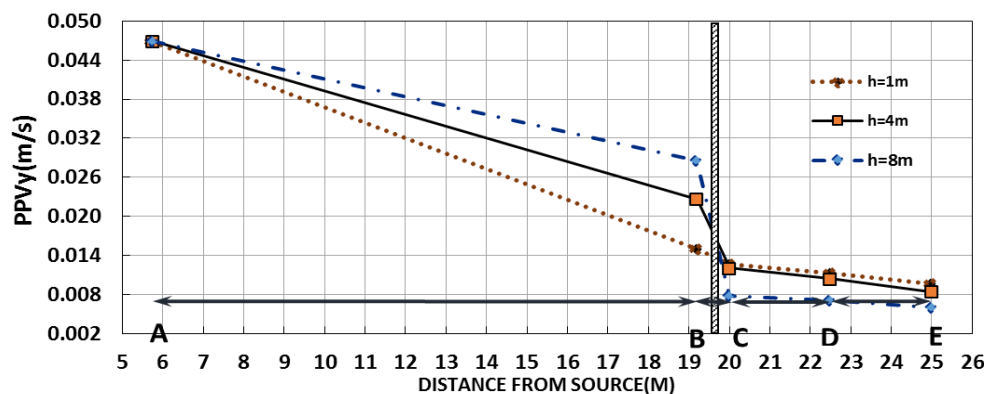


Fig. 16. Peak particle velocity at the depths of 1, 4, 8 m - soil S3

شکل (۱۷) نمودار حداکثر سرعت ذره برای ترانشه‌های با عمق ۲، ۳ و ۴ متری - خاک S3

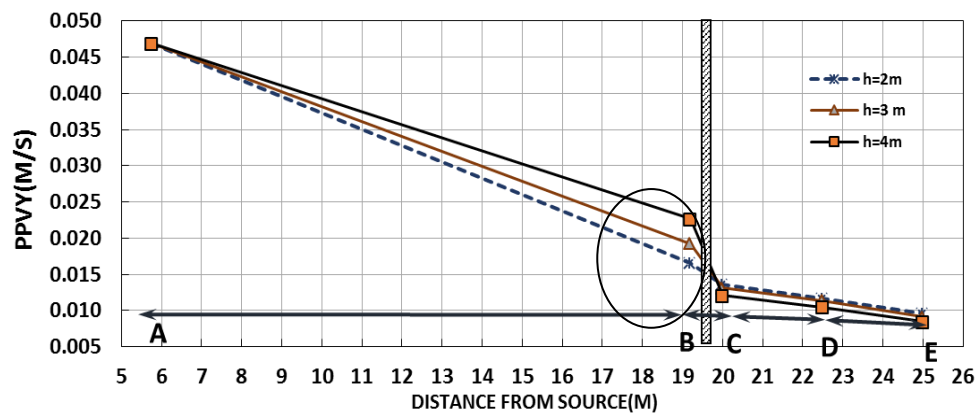


Fig. 17. Peak particle velocity at the depths of 2, 3, 4 m - soil S3

(۱۹) مشاهده می‌شود، نتایج به دست آمده تطابق قابل قبولی با نتایج معادله تئوریک دارد.

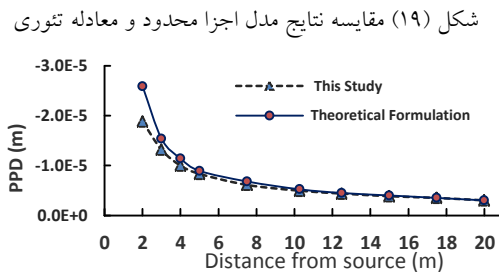


Fig. 19. results of finite element methods and theoretical formulation

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش بر این بود که برای ترانشه باز در حالت مقاوم، اثر عمق ترانشه و تراکم خاک دانه‌ای در تخفیف دامنه لرزش‌ها بررسی شود. برای این منظور از مدل شبیه سازی بار قطار استفاده شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد.

- در مدلسازی‌های بدون ترانشه مشاهده شد که پس از اعمال بار، تغییر شکل‌ها، با فاصله گرفتن از مرکز اثر بارگذاری کاهش یافته و تغییر شکل نیز یکنواخت‌تر شد، بنابراین می‌توان گفت که میرایی هندسی و میرایی مصالح مهمترین عامل در کاهش تغییر شکل‌ها مشاهده شده است.

$$A_2 = A_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n \quad (9)$$

- در حالت بدون ترانشه با توجه به تاریخچه زمانی جابه‌جایی قائم برای نوع خاک مدلسازی شده، تغییر شکل‌های سطح برای خاک S3 در حدود ۱/۸ برابر تغییر مکان‌های خاک S1 است. به عبارت دیگر با کاهش تراکم خاک میزان ارتعاشات ناشی از حرکت قطار به مراتب بیشتر می‌شود.

- حضور ترانشه باعث انقطاع در مسیر دسترسی امواج سطحی به ساختمان می‌شود و نتایج به دست آمده این مورد را تصدیق می‌نماید. با حضور ترانشه، مقدار سرعت ذره در محل ساختمان محافظت شده به وسیله ترانشه، کاهش می‌یابد.

- بیشترین کاهش سرعت ذره دقیقاً بعد از محل ترانشه مشاهده

شکل (۱۸) نمودار PPV برای اعماق ترانشه ۲، ۳ و ۴ متری S3

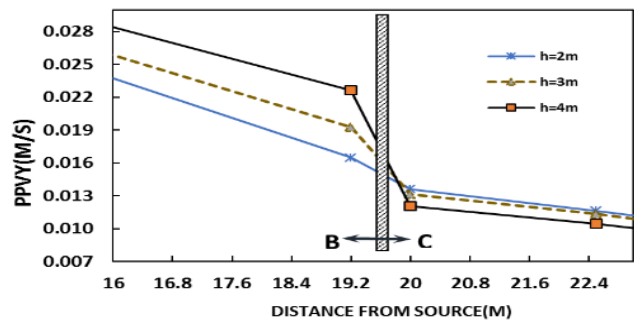


Fig. 18. PPV diagram for trench depth of 2, 3, 4 m - soil S3

در ترانشه با عمق ۲ متر همان‌گونه که در شکل مشخص است کمترین کاهش در دامنه سرعت قائم در محل عبور از ترانشه مشاهده شد. بخش عمده کاهش در این مورد مربوط به آثار میرایی مصالح است. کاهش دامنه در اثر حضور ترانشه با عمق ۳ و ۴ متری، بیشتر متأثر از اثر حضور ترانشه می‌باشد تا اثر میرایی مصالح.

۵- اعتبار سنجی مدل

برای راستی آزمایی از نتایج به دست آمده از رابطه پیشنهاد شده وودز و ریچارد (۱۹۹۷) برای کاهش دامنه موج، استفاده شد. رابطه پیشنهادی کاهش دامنه انتشار امواج ارتعاشی ناشی از میرایی هندسی در خاک به صورت (رابطه ۹) ارائه شده است.

که A_1 دامنه موج در نقطه ۱ (نقطه‌ای در فاصله r_1 از منبع) و A_2 دامنه موج در نقطه ۲ (نقطه‌ای در فاصله r_2 از منبع) و n ضریب میرایی هندسی، برابر ۰/۵ (برای امواج سطحی) است [۱۹].

با اعمال بار پالسی بر مدلسازی عددی ساخته شده، تاریخچه زمانی جابه‌جایی برای نقاط در فواصل مختلف ترسیم شده و همچنین با استفاده از روش تئوریک مقدار دامنه تغییر شکل قائم به دست آمد.

با ترسیم بیشینه جابه‌جایی‌های تاریخچه زمانی مدل (PPD^1) در فواصل مختلف، بین نتایج روش تحلیلی و روش مدلسازی انجام گرفته، مقایسه صورت گرفت. همان‌گونه که در شکل

میرایی هندسی و رایلی باشد.

۷- مراجع

References

- [1] ISO 14837-1 (2005) "mechanical vibration Ground borne noise and vibration arising from rail system", part1: General guidance .
- [2] Ungless, RF. (1973) "An infinite element", M. A. Sc. Dissertation, Columbia, University of British.
- [3] Bettess, P. (1977) "Infinite elements", International Journal for Numerical Methods in Engineering., Vol. 11, pp. 53-64.
- [4] Dominguez, J., Roesset, JM. (1978) "Dynamic stiffness of rectangular foundations", Research report R78-20 Department of Civil Engineering, MIT.
- [5] Krylov, VV., Ferguson, CC. (1995) "Recent progress in the theory of railway generated ground vibrations", Proc. Inst. Acoustic, Vol. 17, pp. 55-68.
- [6] Barber, JR. (1996) "Surface displacements due to a steadily moving point force", Journal of Applied Mechanics, Vol. 63, pp. 45-51.
- [7] Celebi, E., Kirtel, O. (2013) "Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations", Engineering Structures, pp. 122-131.
- [8] Woods, R.D., (1967) "Screening of surface waves by trenches", PhD dissertation Univ. of Michigan.
- [9] Garg, V. K. and Vukkipati, R. V. (1984) "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press.
- [10] Lars, H. (2003) "Simulations and Analyses of Train-Induced Ground Vibrations in Finite Element Models", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 23, p.p. 403-413.
- [11] Nejati, H., Ahmadi, M. (2012) "Numerical analysis of ground surface vibration induced by underground train movement", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 29, pp.1-9.
- [12] Glynn, James. (2004) "Advanced Modern Engineering Mathematics", (3th Edition), ISBN 0-130-39-218-9, UK, Pearson press.
- [13] Oppenheim, Alan V., Willsky, Alan S. (1996), "Signals and Systems", (2nd Edition), ISBN-10, USA, Pearson press.
- [14] Mir Mohammad Sadegi, (2008) "Principles of analysis and design of railway ballast lines", (3th Edition), ISBN 964-454-185-5, Iran, Iran University of Science and Technology press. (In persian)
- [15] Kuhlmeier R L, Lysmer J. (1973) "Finite element method accuracy for wave propagation problems", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99(SM5): 421-427
- [16] Chopra, A.K., (1995), "Dynamics of Structure", First Edit., New Jersey, Prentice hall.
- [17] Connolly, A., Giannopoulos, W., Fan, P. K., Woodward M. C., Forde, R. (2013) "Optimizing low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations", Construction and Building Materials, Vol. 44, pp. 557-564.
- [18] Shrivastava, K., Kameswara, Rao (2002) "Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, pp. 695-702.
- [19] Woods & Richard (1997) "Dynamic effects of pile installations on adjacent structures", Washington: NCHRP_syn_253.
- [20] Chiang, C. Tsai, P. (2014) "A Numerical Study of the Screening Effectiveness of Open Trenches for High-Speed Train-Induced Vibration" shock and vibration.

شد، چرا که در فواصل بیشتر، امکان انتقال امواج لرزه‌ای که از زیر ترانشه عبور کرده‌اند به سازه مورد نظر وجود دارد.

- قبل از ترانشه به دلیل وجود انعکاس امواج با بدنه ترانشه، در سرعت ذره افزایش نسبی مشاهده می‌شود (نقطه B). در این حالت نیز با فاصله گرفتن از ترانشه (نقطه A) از مقدار افزایش دامنه، کاسته خواهد شد.

- افزایش عمق ترانشه باعث کاهش بیشتر در دامنه تغییر شکل‌ها می‌شود. چرا که امواج سطحی بیشتری در ترانشه‌های عمیق‌تر سد می‌شوند. علاوه بر این امکان پرده‌کشی بخشی از امواج حجمی نیز بوجود می‌آید. به عنوان نمونه با افزایش عمق ترانشه از ۱ متر به ۸ متر ۴۳ درصد دامنه بیشینه سرعت ذره کاهش پیدا کرد.

- از نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان به جابه‌جا شدن فرکانس اصلی خاک با تغییر در مدول ارتجاعی اشاره کرد. به این صورت که هرچه تراکم خاک بیشتر شود فرکانس با دامنه حداکثر در فرکانس‌های بزرگتر رخ می‌دهد. به عنوان نمونه دامنه بیشینه در خاک S1 در فرکانس ۲ هرتز مشاهده شد در حالی که برای خاک S3 این عدد برابر ۷/۵ هرتز است.

- حضور ترانشه در خاک S3 نیز دامنه فرکانس غالب را کاهش داده و افزایش کمی در دیگر فرکانس‌ها، باعث شده است. کاهش دامنه فرکانس غالب در نقطه پیک در حدود ۴۱ درصد مشاهده شد. اما برای خاک S1 افزایش عمق ترانشه، باعث افزایش ۲۳ درصدی دامنه فرکانس غالب می‌شود.

- با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته مشاهده شد که تاثیر تراکم خاک بر پارامتر Δt و همچنین جابه‌جایی نرمالیزه شده محسوس نیست.

- افزایش عمق ترانشه باعث کاهش بیشتر دامنه فرکانس اصلی طیف توان لرزش نیز می‌شود و در دیگر فرکانس‌های آن نیز افزایش کمی، مشاهده می‌شود. به عنوان نمونه در خاک S3 با افزایش عمق ترانشه از ۱ به ۸ متر ۳۰ درصد از دامنه فرکانس اصلی کاسته شد. این قابلیت امکان فیلتراسیون فرکانس انتخابی برای سازه مورد نظر را فراهم می‌آورد.

- کمینه عمق انتخابی ترانشه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کاهش دامنه ایجاد شده به مراتب بیشتر از کاهش دامنه ناشی از

Numerical study of soil compaction and the passive trench barrier depth on reduction of the vibration induced by train movement

E. Saadatfar¹, A. Ardakani^{*2}

1,2. Faculty of Engineering & Technology, Imam Khomeini International University

a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

Vibration due to train movement has been concerned since the advent of rail transportation systems. Nowadays, increasing in speed of the trains and weight of the wagons, in addition to the development of rail way in urban areas have made this subject to be more important. Different methods and techniques have been proposed to reduce mentioned vibrations. In this study, geotechnical modeling of the trench barrier isolator is investigated by numerical modeling to reduce train vibrations. According to the location, trench barriers are divided into two main categories: active and passive. Active trench is located near the source load, but passive trench is located near the structure that needs protections. The main focus of this research is the effects of soil compaction and trench depth on the efficiency of passive trench barrier. By considering the weight of wagons and the distance between the wheels, changes in the load is determined in terms of time domain. The load-time function is presented by calculating Fourier spectra and effective frequency range. A series of nonlinear finite-element analyses are carried out to study the effects of soil stiffness and trench depth. In this regard, three different soil types are investigated and the depths of the trench are considered to differ from zero to eight meters. Then, modeling of rail, sleeper, ballast, sub-ballast and soil layers is conducted to analyze wave vibration propagation due to train movement and to evaluate the amplitude reduction due to trench barrier. Mohr Coulomb failure criterion is supposed for soils, ballast and sub-ballast layer and a linear elastic behavior was assumed for the sleeper. Infinite element boundaries are used at the lateral sides of the finite element mesh for prevention of wave reflection. Viscous damping is considered by means of Rayleigh methods. The dynamic response analysis is based on input time historical wagon load which determined in previous section applied at the sleeper. Therefore, by studying the deformations and displacements, particle velocity of the elements in the model, effects of the trench barrier on before and after trench, are considered. Results indicate that increase in trench depth is effective in reduction of the vibration. This means that by increasing the depth of the trench, the amplitude of deformation becomes more reduced. It also results in increasing the depth of the trench and reduction of the dominant wave frequency vibrations. On the other hand, by increasing the depth of the trench, amplitude reduction ratio has a significant decrease that means increased efficiency trenches. The relationship between depth and amplitude reduction ratio (Arr) is introduced as a quadratic function. On the other hand, changing soil properties shows that soil compaction has no significant effect on the efficiency of the trench but it changes the frequency content of vibration; as maximum amplitude of looser soil occurs at lower frequencies. For validation, amplitude decreasing of wave propagation in the theoretical equation is compared with numerical modeling. The result showed that there is a good accordance between numerical model and theoretical equation at different distances. The minimum depth of the trench should be selected based on different parameters. It must be noted that the minimum depth of the trench should be significantly greater than the depth which is determined by geometric and material damping. Reducing the required to mitigate the potential damage of protected structures and economic and implementation considerations are important factors in the determination of final depth of the trench barrier isolator.

Keywords: Load-time function of train movement, Vibration, Trench barrier, Depth, Soil compaction.