

## ارزیابی روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از خطوط مترو بر سازه‌های سطحی

محمد حاجی محمدی\*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رضا پورحسینی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمدحسن بازیار، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hajimohammadi\_eng@yahoo.com

دریافت: ۹۵/۰۴/۲۵ - پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۰

### چکیده

روش‌های کاهش ارتعاشات منتشره در محیط زمین و کاهش مزاحمت‌های آن در مناطق شهری با توجه به توسعه‌ی روز افزون مترو، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر، ضمن مدلسازی فونداسیون ساختمان، بار ناشی از طبقات، تونل مترو و خاک محیط اطراف آن، ترانسه‌ای توپیر در فاصله‌ی ۱۰ متری از مرکز تونل و بلوک افقی در زیر فونداسیون ساختمان به عنوان دو راهکار برای کاهش ارتعاشات، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات برای ساختمان‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه بررسی شده است. ابتدا، مدلسازی مناسب مسئله و شرایط مرزی آن در انتشار امواج مورد بررسی قرار داده شده است. سپس میرایی ماکزیمم شتاب حاصل از قطار در سطح زمین، با داده‌های مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰) که با نرم افزار ABAQUS صورت گرفته است، برای معتبرسازی نرم افزار FLAC مقایسه شده است. در نهایت اثرات وزن ساختمان و دو پارامتر ترانسه توپیر و بلوک افقی شامل ضخامت و سرعت موج برشی در کاهش این ارتعاشات بر سازه‌های مجاور در سطح به صورت مدلسازی عددی توسط نرم افزار FLAC 5.0 مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش وزن ساختمان میزان ارتعاشات دریافت شده در فونداسیون به دلیل افزایش سطح تنش زیر ساختمان کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش در سرعت موج برشی و ضخامت موانع باعث افزایش در میزان کاهش ارتعاشات می‌شود به طوری که پارامتر سرعت موج برشی در ترانسه توپیر و پارامتر ضخامت در بلوک افقی موثرتر عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کاهش ارتعاش، مترو زیر زمینی، ترانسه توپیر، بلوک افقی، FLAC

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مسئله‌ی ارتعاشات ناشی از عبور و مرور قطار با گسترش و توسعه‌ی حمل و نقل ریلی در حال افزایش می‌باشد. بهترین راهکار از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی برای مقابله با این مسئله، بررسی و ارزیابی دقیق از مشکل، قبل از ساخت و بهره برداری خطوط ریلی جدید می‌باشد. اکثر کلان شهرها با توجه به توسعه‌ی روز افزون مترو و قطارهای سریع السیر داخل شهری با شکایات و مشکلات زیادی نسبت به ارتعاشات و لرزش‌های حاصل از خطوط ریلی در مناطق مسکونی، بیمارستان‌ها، آزمایشگاه‌ها و مراکز علمی با دقت بالا روبرو هستند و همواره در فکر کاهش و رفع این ارتعاشات و لرزش‌ها بوده‌اند (XIA (et al.), 2007).

برای کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطار در خاک، روش‌های گوناگونی در طول زمان‌های مختلف بسط و توسعه داده شده است. از معروفترین این روش‌ها می‌توان، احداث ترانسه‌ی توپیر<sup>۱</sup> و بلوک افقی مانع موج<sup>۲</sup>

گرفت (Beskos, Dasgupta and Vardoulakis, 1986). آدام و استروف اثر ترانشه‌ی توپر از بتونیت و توخالی را در کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار برای ساختمان ۶ طبقه به کمک آنالیز به روش دوبعدی FEM را بررسی کردند (Adam and Estorff, 2005). یانگ وهانگ با ترکیب روش المان محدود و المان نامحدود به بررسی اثر پارامترهای هندسی و مصالحی ترانشه‌ی توپر و توخالی و فونداسیون‌های الاستیک در کاهش ارتعاشات قطار پرداختند (Yang and Hung, 1997). همچنین معتمد و همکاران به بررسی موانع موج هم از لحاظ هندسی و هم از لحاظ مشخصات مصالح به عنوان راهکاری برای کاهش ارتعاشات قطار به روش دوبعدی FEM در نرم‌افزار ABAQUS پرداختند (Motamed et al., 2010). با این وجود، کارهای کمتری بر روی اثر ترانشه‌ی توپر و WIB به عنوان مانع موج به روش FDM صورت گرفته است.

هدف از این تحقیق، بررسی ارتعاشات ناشی از حرکت مترو و ارزیابی اثرات دو پارامتر ترانشه‌ی توپر و WIB با مقاطع هندسی معادل، به عنوان روشهای کاهنده با رویکرد عددی توسط نرم افزار تفاضل محدود 5 FLAC می‌باشد. نرم افزار FLAC، نرم افزاری است که روش عددی تفاضل محدود غیر ضمنی<sup>۴</sup>، با تحلیل لاگرانژی<sup>۵</sup>، را برای شبیه سازی مدل‌های خاک، سنگ و مدل‌های دیگر مورد استفاده قرار می دهد (Itasca Consulting Group, 2005). این نرم‌افزار قادر است شرایط اجرایی و واقعی را به صورت مطلوبی شبیه‌سازی کند. در این بررسی، دو پارامتر هندسی از ترانشه‌ی توپر و WIB شامل سرعت موج برشی و ضخامت مطالعه شده‌اند. همچنین مدلی به عنوان مرجع، بدون هیچ مانعی<sup>۶</sup> مورد آنالیز قرار گرفته است و نتایج حاصل از آن با مدل‌های دارای موانع مقایسه شده و اثرشان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات برای ساختمان‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه به صورت عددی بررسی شده است. لازم به ذکر است که پیش از این در مورد ارزیابی اثرات پارامترهای دو روش ترانشه‌ی توپر

اشاره نمود. روش احداث ترانشه به دو نوع توخالی و توپر از مصالح تقسیم می‌شود. بررسی اثرات روش ترانشه در کاهش ارتعاشات توسط وودز (۱۹۶۸)، لیسمر و واس (۱۹۷۲)، سیگل و همکاران (۱۹۷۸)، یانگ وهانگ (۱۹۹۷)، هانگ (۲۰۰۰) وهانگ و همکاران (۲۰۰۴) صورت گرفته است (Yang and Hung, 2009). ایده‌ی روش WIB، برگرفته از سنگ بستر طبیعی به عنوان مانعی در دفع و پخش ارتعاشات می‌باشد. پس با ایجاد سنگ بستری مصنوعی همچون تزریق سیمان داخل خاک در زیر ساختمان‌ها نیز می‌توان از اثر این ارتعاشات کاست. افرادی نظیر اشمید و همکاران (۱۹۹۱)، آنتیس و ونستورف (۱۹۹۴)، تاکیمیا و فوجی وارا (۱۹۹۴) وهانگ و همکاران (۲۰۰۴) روش WIB را بسط و توسعه دادند (Yang and Hung, 2009). ایزولاسیون ارتعاشات ناشی از مترو، موضوع مهمی در سال‌های اخیر می‌باشد. به طور کلی می‌توان با فراهم کردن یک مانع مناسب در برابر موج و محافظتی بین منبع ارتعاش و سازه، از اثرات مضر این ارتعاشات جلوگیری کرد. با توجه به محدودیت‌هایی که برای کارهای آزمایشگاهی وجود دارد و فقط تعداد کمی مطالعات آزمایشگاهی برای راهنمای طراحی موجود می‌باشد، روش‌های عددی گوناگونی توسط محققان برای حل مسائل انتشار امواج و کاهش ارتعاشات مورد استفاده قرار گرفت. معروفترین مطالعات بر روی ارتعاشات ناشی از حرکت قطار توسط مدل‌های اجزا محدود (FEM)، المان مرزی (BEM) و تفاضل محدود (FDM) صورت گرفته است. آنتربرگر و همکاران نرم افزار FLAC را که برمبنای روش تفاضل محدود است برای تجزیه و تحلیل ارتعاشات ناشی از خط متروی وینا<sup>۳</sup> به کاربردند (Unterberg, Poisel, and Honeger, 1997). همچنین آیلو و همکاران نرم افزار دوبعدی 5.0 FLAC را برای پیش بینی ارتعاشات ناشی از حرکت قطار در متروهای ناپل و تورین ایتالیا به کار بردند (Aiello et al., 2008). مطالعه بر روی تاثیر موانع ترانشه توپر و توخالی به صورت ویژه توسط بسکوس و همکاران به کمک روش المان مرزی (BEM) صورت

دو روش ایزولاسیون، مقایسه‌ی خوبی انجام داد. به دلیل این که طول فونداسیون ساختمان ۲۰ متر در نظر گرفته شده و بلوک افقی در زیر فونداسیون قرار می‌گیرد، پس طول بلوک افقی در زیر فونداسیون برابر ۲۰ متر در نظر گرفته می‌شود و به دلیل معادلسازی ابعاد هندسی دو روش ایزولاسیون، عمق ترانشه‌ی نیز برابر ۲۰ متر قرار داده می‌شود.

برای ارزیابی و مقایسه‌ی این دو روش ایزولاسیون، دو پارامتر سرعت موج برشی موانع و ضخامت آنها به صورت متغیر فرض شده‌اند. در بررسی‌های فوق، اثر بارگذاری برای یک ساختمان ۵ طبقه بر روی فونداسیونی بتنی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات برای ساختمان‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه به صورت بار وارده بر روی فونداسیونی بتنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل مسئله، در شرایط کرنش مسطح انجام می‌شود. این حالت تحلیل برای تحلیل موانع موج به ویژه ایزولاسیون‌های مقاوم از دقت کافی برخوردار است.

با استفاده از نرم افزار دوبعدی FLAC 5.0، مدل تفاضل محدودی براساس مدل هندسی فرض شده مدلسازی شده است. شکل (۱) مدلسازی صورت گرفته در نرم افزار FLAC را براساس پارامترهای هندسی که قبلاً به آنها اشاره شده، نشان می‌دهد. در آنالیز دینامیکی با استفاده از روش‌های عددی، ممکن است در انتشار موج خطای عددی به وجود آید که این خطا تابع شرایط مدل‌سازی و ابعاد مش‌بندی می‌باشد. در مسائل انتشار امواج، ابعاد المان باید با توجه به بالاترین فرکانس و کمترین سرعت موج ( $V_R$ ) انتخاب شود (Itasca Consulting Group, 2005). کولمیر و لیسمر ماکزیمم سائز المان را یک هشتم کوتاه‌ترین طول موج پیشنهاد کردند (رابطه‌ی ۱) (Kuhlemeyer and Lysmer, 1973).

و بلوک افقی مانع موج (WIB) درخصوص کاهش ارتعاشات ناشی از خطوط زیرزمینی و مترو به روش تفاضل محدود، مطالعه‌ای صورت نگرفته است، به طوری که مطالعات فراوانی در خصوص خطوط ریلی در سطح زمین وجود دارد.

## ۲- مشخصات محیط انتشار امواج و مدلسازی

### در FLAC

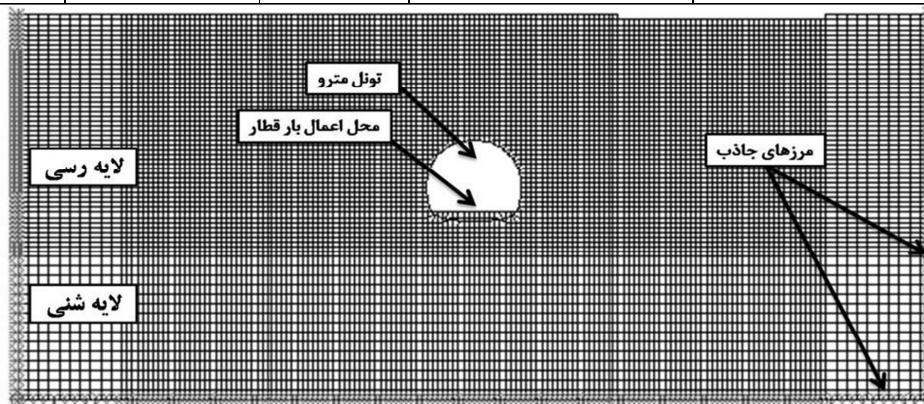
مسئله مورد بررسی در این تحقیق، مقطع تونلی از مترو است که داخل محیطی دارای دو لایه‌ی مختلف از خاک قرار گرفته و بر روی سطح زمین، در مجاورت خط مترو، فونداسیون ساختمانی به همراه بار ناشی از ۵ طبقه فرض می‌شود.

زمین به صورت محیطی همگن و ایزوتروپیک با دو لایه از جنس خاک رس و خاک درشت دانه شنی با مدل رفتاری موهر کولمب در نظر گرفته می‌شود. مقطع تونل به شکل تخم مرغی به قطر ۹ متر با لاینینگ بتنی به ضخامت ۰/۳ متر، دال کف به ضخامت یک متر و در عمق ۱۷/۵ متر از سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. فونداسیون ساختمان از جنس بتن، به طول ۲۰ متر، ضخامت ۱ متر، به فاصله‌ی ۱۴ متر از مرکز تونل و ۰/۵ متر پایین تر از سطح زمین فرض می‌شود. برای بتن لاینینگ تونل، دال کف و فونداسیون ساختمان به خاطر صلب بودن آن نسبت به خاک اطراف و همچنین به دلیل سهولت در انجام کار، از مدل رفتاری الاستیک استفاده شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در مسئله در جدول (۱) نشان داده شده است.

به عنوان راهکارهایی برای کاهش ارتعاشات، ترانشه‌ای توپر در فاصله‌ی ۱۰ متری از مرکز تونل و بلوکی افقی در زیر فونداسیون ساختمان به صورت موانعی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. ابعاد مقاطع ترانشه‌ی توپر و بلوک افقی معادل یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند تا بتوان بین این

جدول ۱. مشخصات مصالح (مهندسين مشاور ايران خاک، ۱۳۹۱).

| مصالح                                | وزن مخصوص خشک ( $\text{kg/m}^3$ ) | ضریب پواسون | مدول برشی (MPa) | C (KPa) | $\varphi^\circ$ |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------|---------|-----------------|
| خاک رسی (۱۶-۰ متر)                   | ۱۸۶۰                              | ۰/۴         | ۷/۱۴            | ۵۰      | ۲۰              |
| خاک درشت دانه شنی (۴۰-۱۶ متر)        | ۲۰۴۰                              | ۰/۳         | ۳۰/۸            | ۲۵      | ۳۶              |
| بتن فونداسیون، لاینینگ و دال کف تونل | ۲۵۰۰                              | ۰/۱۵        | ۸۷۰۰            | -       | -               |



شکل ۱. مدل تفاضل محدود در نرم افزار FLAC.

که در آن  $G$  مدول برشی خاک،  $\nu$  ضریب پواسون خاک و  $r_0$  شعاع تونل می‌باشد. با توجه به مشخصات پارامترهای ذکر شده در مدل داریم:

$$K_n = 7/91 \text{ E} \text{ Pa} \quad K_s = 1/37 \text{ E} \text{ Pa}$$

$$\varphi = 14 \quad C = 33/33 \text{ kpa}$$

برای حفظ پایداری و دقت در مدلسازی، نرخ افزایش زمان نیز باید لحاظ شود. اگر نرخ افزایش زمان بیش از حد بزرگ باشد، ناپایداری عددی رخ می‌دهد (Itasca Consulting Group, 2005). محاسبه‌ی نرخ افزایش زمان بستگی به سایز المان دارد که رابطه‌ی آن توسط زور و همکاران به صورت زیر بیان می‌شود (رابطه‌ی ۳) (Zerwer, Cascante and Hutchinson, 2002).

$$\Delta t \leq \frac{C \cdot \Delta L}{V_p} \quad C \leq 1 \quad (3)$$

که  $\Delta L$  سایز المان،  $V_p$  سرعت موج حجمی،  $C$  برابر یا کوچکتر از یک و  $\Delta t$  نرخ افزایش زمان می‌باشد. در این مطالعه ماکزیمم نرخ افزایش زمان با توجه به پارامترهای فوق برابر ۰/۰۰۱ ثانیه بر طبق پیشنهاد زور در نظر گرفته شده است.

همانطور که مشخص است در آنالیزهای عددی، ابعاد

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{8} = \frac{V_R}{8 \cdot f_{max}} \quad (1)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج رایلی،  $V_R$  سرعت موج رایلی،  $f_{max}$  بالاترین فرکانس موج وارده و  $\Delta L$  سایز المان می‌باشد. ما نیز در این مقاله بر طبق این پیشنهاد کوچکترین سایز المان را برابر ۰/۵ متر با توجه به سرعت موج رایلی زمین ( $V_R = 61.96 \text{ m/s}$ ) و بالاترین فرکانس موج وارده (۱۰ هرتز) اعمال شد.

مدل صورت گرفته، مطابق شکل (۱)، دارای ابعاد ۸۸ متر در ۴۰ متر می‌باشد. مشخصات مصالح در جدول (۱) نشان داده شده است. المان‌ها به صورت ۴ گره‌ای و خطی می‌باشند. سطح مشترک موجود در نرم‌افزار FLAC براساس لغزش کولمب یا جدایشگی کششی فرمول شده است. مشخصات سطح مشترک خاک و پوشش تونل شامل زاویه اصطکاک بین خاک و بتن  $\varphi$  و چسبندگی بین خاک و بتن  $C$ ، سختی برشی  $K_s$  و سختی عمودی  $K_n$  می‌باشد. براساس روابط ارائه شده توسط تیموشنکو و گودیر (۲۰۰۲) می‌توان این ضرایب سختی را به دست آورد (Itasca Consulting Group, 2005):

$$K_n = \frac{4G \cdot r_0}{1-\nu} \quad K_s = \frac{32(1-\nu)G \cdot r_0^3}{7-8\nu} \quad (2)$$

ناشی از انتشار امواج می‌باشد، بستگی به نوع انتشار امواج در داخل مصالح دارد و مستقل از فرکانس است (یعنی به فرکانس وابسته نیست). اگر مصالحی که موج در آن منتشر می‌شود کاملاً الاستیک باشد، فقط میرایی هندسی باعث کاهش (میرایی) دامنه‌ی موج می‌شود. اما برای مصالحی که کاملاً الاستیک نیستند، نظیر خاک یا سنگ، میرایی مصالحی اتفاق می‌افتد. به این ترتیب، میرایی مصالحی با اتلاف انرژی (به علت اصطکاک) در مصالحی که امواج در آن انتشار پیدا می‌کنند اتفاق می‌افتد. نکته‌ی مهم در مدلسازی عددی توجه به میرایی مصالح می‌باشد. در مسائل حوزه زمان و به‌خصوص ارتعاشات حاصل از قطار، به دلیل ایجاد فرکانس‌های مختلف، معمولاً میرایی رایلی مورد استفاده قرار می‌گیرد که روی یک بازه محدود فرکانس، این میرایی تقریباً مستقل است. مولفه‌های ماتریس میرایی (C)، مطابق با رابطه‌ی (5) متناسب با جرم (M) و سختی (K) می‌باشد.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5)$$

که در این رابطه  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب ثابت متناسب با جرم و سختی هستند. برای یک سیستم دارای چند درجه آزادی، ضریب میرایی بحرانی  $\xi_i$ ، در هر فرکانس زاویه‌ای سیستم با استفاده از رابطه‌ی (6) تعیین می‌شود:

$$\xi_i = \frac{1}{2}(\alpha / \omega_i + \beta \omega_i) \quad (6)$$

نسبت میرایی بحرانی به عنوان عامل میرایی بحرانی در مد  $i$  ام با فرکانس زاویه‌ای  $\omega_i$  بیان می‌شود. اگر چه تعیین میرایی محیط به راحتی امکان پذیر نیست، ولی براساس تجربه مقدار میرایی مصالح ژئوتکنیکی، ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته می‌شود.

در بسیاری از مطالعات دینامیکی، فرکانس‌های حساس مربوط به ارتعاش در فرکانس طبیعی سیستم است، بنابراین لازم است تا فرکانس طبیعی سیستم برای اعمال در میرایی رایلی محاسبه شود (Itasca Consulting Group, 2005). فرکانس طبیعی سیستم مورد مطالعه که با اعمال ناگهانی نیروی ثقل به مدل عددی، در حالت بدون میرایی و ثبت تاریخچه حرکت قائم محاسبه شده است، حدود ۱/۵ هرتز

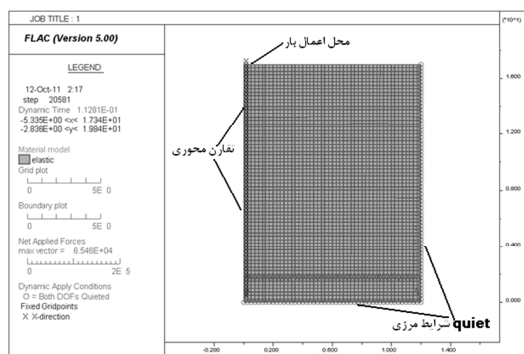
و تعداد گره‌های مدل محدود در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین روش‌های عددی به طور مستقیم قابل استفاده برای سیستم‌های نامحدود نیستند. از این رو روشی عمومی که به واسطه‌ی آن یک سیستم نامحدود می‌تواند توسط یک سیستم محدود تخمین زده شود مورد مطالبه است. در این مورد، کولمیر و لیسمر (۱۹۶۹) شرایط مرزی ویسکوز را پیشنهاد کردند که توانست بر این محدودیت روش‌های عددی غلبه کند (Itasca Consulting Group, 2005). مرزهای ویسکوز شامل میراگرهایی هستند که به صورت مستقل، در جهات برشی و عمودی با مرزها در تماس هستند. میراگرها در حالت کششی نیز عمل می‌کنند که از روابط (۴) محاسبه می‌شوند.

$$t_n = -\rho_p v_n \quad t_s = -\rho_s v_s \quad (4)$$

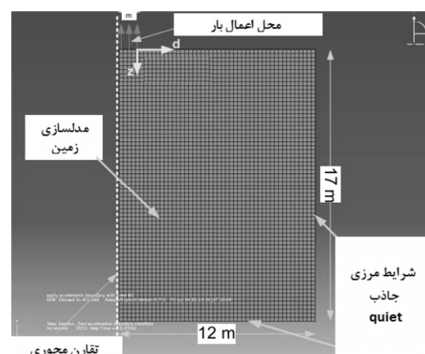
که در این روابط  $v_s$  و  $v_n$  به ترتیب مؤلفه‌های برشی و نرمال سرعت در مرز و  $\rho$  جرم مخصوص و می‌باشند. آنها شرایط مرزی ویسکوز را برای آنالیز مسائل دینامیکی دارای سیستم پیوسته نامحدود معرفی کردند. از این رو یک نیم فضای نامحدود می‌تواند به خوبی و موفقیت آمیز به عنوان یک مدل اجزا محدود و تفاضل محدود مدل شود. برنامه FLAC از این تئوری به روش تفاضل محدود، برای معرفی شرایط مرزی سطح آزاد<sup>۹</sup> و خاموش<sup>۹</sup> استفاده کرده است. این روش مبتنی بر استفاده از میراگرهای عمودی و برشی در مرزهای مدل، انرژی امواج برخوردی را جذب و از بازتاب آن به داخل محیط جلوگیری می‌کند (Itasca Consulting Group, 2005). در مدل صورت گرفته مرزهای جاذب جانبی به صورت سطح آزاد و مرز جاذب پایین به صورت خاموش مدلسازی شده است.

زمانیکه موجی داخل هر محیط فیزیکی ای منتشر شود، انرژی موج توسط محیط پیرامون تلف می‌شود، یعنی موج میرا می‌شود. این موضوع منجر به کاهش تدریجی دامنه‌ی موج با توجه به مسافت پیموده، می‌شود. معمولاً میرایی به دو دسته‌ی (الف) میرایی هندسی<sup>۱۰</sup> و (ب) میرایی مصالح<sup>۱۱</sup> تقسیم بندی می‌شود. میرایی هندسی که

مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰) مطابق شکل (۲-الف) برای تصدیق و معتبرسازی نتایج مدل تفاضل محدود انتخاب شده است.



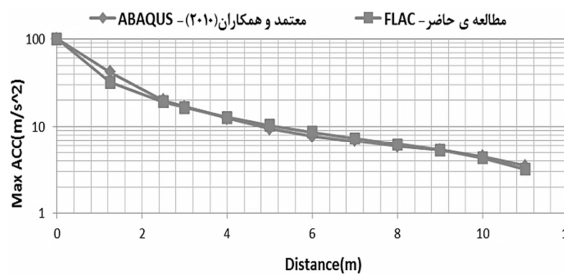
و نسبت میرایی برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است. حال به تصدیق و معتبرسازی مدل برای ارزیابی ارتعاشات ناشی از حرکت قطار می‌پردازیم. در این مطالعه،



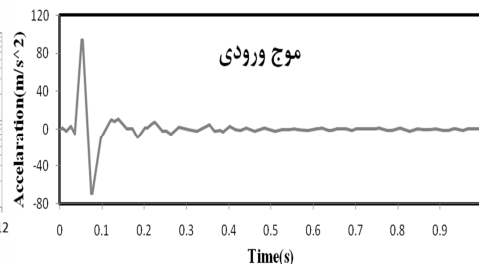
شکل ۲. الف) مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰) در نرم افزار ABAQUS، ب) شبیه سازی مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰) در نرم افزار FLAC

جدول ۲. مشخصات مصالح زمین (Itoh, ۲۰۰۳)

| مخالص        | مدول برشی (Pa) | ضریب پواسون | وزن مخصوص خشک (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|----------------|-------------|------------------------------------|
| خاک (Dr=80%) | ۱۷۹۰۰۰۰۰       | ۰/۲۳        | ۱۵۴۳/۵                             |



شکل ۴. مقایسه بین نتایج مدل FLAC و نتایج مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰)



شکل ۳. موج ورودی اعمال شده در مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰)

اعمال می‌شود. فرکانس این موج ۱۰ هرتز می‌باشد تا در محدوده‌ی فرکانس ارتعاشات زمینی ناشی از حرکت قطار قرار گیرد (Yashioka, 2000). سپس میرایی ماکزیمم شتاب در سطح زمین ثبت می‌شود. شکل (۴) مقایسه‌ی بین میرایی ماکزیمم شتاب در سطح زمین مدل اجزای محدود معتمد و همکاران در ABAQUS را با مدل تفاضل محدود در FLAC نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نتایج تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد و این گویای تصدیق و صحت عملکرد نرم افزار در مدلسازی عددی می‌باشد.

مدل متقارن محوری، مطابق شکل (۲)، دارای ابعاد ۱۲ متر در ۱۷ متر می‌باشد. مشخصات مصالح زمین در جدول شماره (۲) نشان داده شده است که بر طبق مدل معتمد و همکاران انتخاب شده است. این مدل براساس مدل سانتریفیوژ ایتوه<sup>۱۲</sup> که برای اندازه‌گیری ارتعاشات حاصل از قطار طراحی شده بود، شبیه سازی شده است. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص این مدل می‌توانید به مرجع (Itoh, 2003) مراجعه نمایید. حال موج ورودی در مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰) به بالای مدل FLAC

### ۳- بارگذاری ارتعاشی مترو

در نظر گرفتن همه نیروهای قطار در مدلسازی باعث پیچیدگی مدل می شود. در اغلب مسائل مهندسی از حالت ساده شده برای مدلسازی استفاده می شود. ساده سازی مدل ها بستگی به هدف تحلیل دارد. به عنوان مثال؛ اگر هدف اصلی، بررسی پاسخ محیط اطراف تونل راه آهن در برابر حرکت قطار باشد، در نظر گرفتن جزئیات تماس چرخ و ریل و عوامل مشابه که تنها اثرات موضعی دارند، بی معنی خواهد بود. بارهای دینامیکی را می توان به صورت تاریخیچه ای از شتاب، سرعت، تنش، و یا نیرو به مدل اعمال نمود. از آنجایی که زمان محاسبه و حل مدل یکی از فاکتورهای مهم است تا آنجا که ممکن است باید مدل ها ساده شوند. در این تحقیق ابتدا در مدل طولی واگن ها نیروی اعمال شده از طرف چرخ های یک بوژی قطار به کف، محاسبه شده و سپس همین نیرو در مدل عددی به صورت دو بار نقطه ای در محل ریل ها به کف تونل در مدل اعمال گردید. بنابراین بارگذاری به صورت دو پالس مستطیلی با دامنه ی ۷۰ کیلونیوتن و مدت زمان اعمال ۱۰ میلی ثانیه می باشد، که بیانگر بارگذاری یک بوژی قطار مترو با بار محوری ۱۴۰ کیلونیوتن و سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت می باشد. فاصله زمانی ۰/۰۷۵ ثانیه بین دو پالس ناشی از فاصله ی بین چرخ های یک بوژی می باشد (معاونت تجهیز و بهره برداری، ۱۳۹۰).

در این تحقیق تابع نیروی محاسبه شده با توجه به پارامترهای قطار متروی ایران، به عنوان تاریخیچه نیرو به صورت دو بار نقطه ای همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، به مدل اعمال می شود. میزان فرکانس حاصل از این بارگذاری، محدوده ی تمام فرکانس هایی را که توسط مترو سبب می شود را در بر می گیرد. ابتدا مدلی را بدون هیچ مانع و روش کاهنده ی ارتعاش، برای فراهم آمدن شرایط مناسب مقایسه آنالیز می کنیم. سپس با توجه به پارامترهای ذکر شده در ادامه آنالیزهایی برای دو روش ایزولاسیون انجام می دهند.

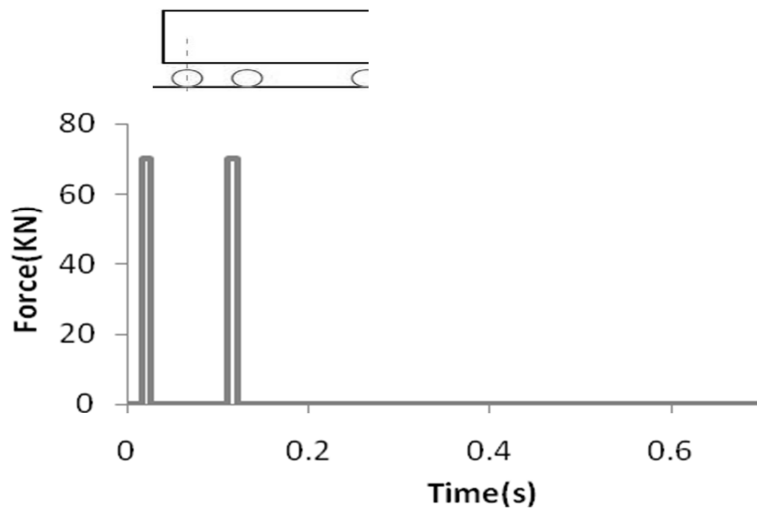
### ۲-۴- اثر ترانشه های توپر و بلوک های افقی به عنوان

#### مانع موج در کاهش ارتعاشات زمینی

در این تحقیق هم اثر هندسه و هم اثر مشخصات مصالح ترانشه ها به صورت یک مطالعه ی پارامتری ارزیابی می شود. از لحاظ مصالح چهار نوع ترانشه با مصالحی با سرعت موج برشی متفاوت که مشخصات مکانیکی و دینامیکی آنها در جدول (۳) آمده است، در فاصله ی مشخص ۱۰ متری از مرکز تونل، عمق ثابت ۲۰ متری و ضخامت ۰/۵ متری مورد بررسی قرار می گیرند. همانطور که در جدول مشاهده می گردد، سرعت موج برشی مصالح موانع براساس نسبتی از سرعت موج برشی خاک لایه فوقانی انتخاب شده است. از لحاظ هندسی مشخصات مصالح یک ترانشه ی توپر با چهار حالت مختلف در ضخامت (۲ و ۱/۵، ۱، ۰/۵) مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین هم اثر هندسه و هم اثر مشخصات مصالح بلوک های افقی به صورت یک مطالعه پارامتری نیز ارزیابی می شود. از لحاظ مصالح چهار نوع بلوک افقی با مصالحی یکسان با مصالح ترانشه ها، در زیر فونداسیون ساختمان، طول ثابت ۲۰ متری و ضخامت ۰/۵ متری مورد بررسی قرار می گیرند. از لحاظ هندسی همانند روش ترانشه، مشخصات مصالح یک بلوک افقی با چهار حالت مختلف در ضخامت (۲ و ۱/۵، ۱، ۰/۵) مورد بررسی قرار می گیرد. شکل (۶) مدلسازی ترانشه ی توپر و بلوک افقی را در نرم افزار FLAC نشان می دهد.

### ۲-۵- اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات

در کلیه مدل های بالا، فونداسیون ساختمانی به همراه بار ناشی از ۵ طبقه بر روی آن مدلسازی شده است. برای بررسی اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات مترو، بارگذاری صورت گرفته را برای دو حالت ساختمان یک طبقه و ساختمان ۱۰ طبقه نیز تغییر می دهیم و برای سه حالت ۱، ۵ و ۱۰ طبقه، میزان ارتعاشات دریافتی را بررسی می کنیم. در بارگذاری، وزن یک مترمربع از هر طبقه ی ساختمان  $1 \text{ ton/m}^2$  فرض شده است.



شکل ۵. تاریخچه زمانی بار اعمال شده در نرم افزار

جدول ۳. مشخصات مصالح موانع

| موانع | دانسیتته<br>( $\text{kgf/m}^3$ ) | ضریب<br>پواسون | مدول برشی<br>$G_b(\text{Pa})$ | سرعت موج برشی مانع<br>$V_b(\text{m/s})$ | نسبت سرعت موج برشی مانع به سرعت<br>موج برشی خاک رس ( $V_b/V_s$ ) |
|-------|----------------------------------|----------------|-------------------------------|---|--|
| ۱     | ۲۰۰۰                             | ۰/۳۵           | $۳E+۷$                        | ۱۲۳/۹۸                                  | ۲  |
| ۲     | ۲۰۰۰                             | ۰/۳۵           | $۱/۲۳E+۸$                     | ۲۴۷/۹۵                                  | ۴  |
| ۳     | ۲۰۰۰                             | ۰/۳۵           | $۴/۹۳E+۸$                     | ۴۹۶/۲۸                                  | ۸  |
| ۴     | ۲۰۰۰                             | ۰/۳۵           | $۱/۹۷E+۹$                     | ۹۹۱/۶۳                                  | ۱۶   |

### ۳- بررسی نتایج عددی

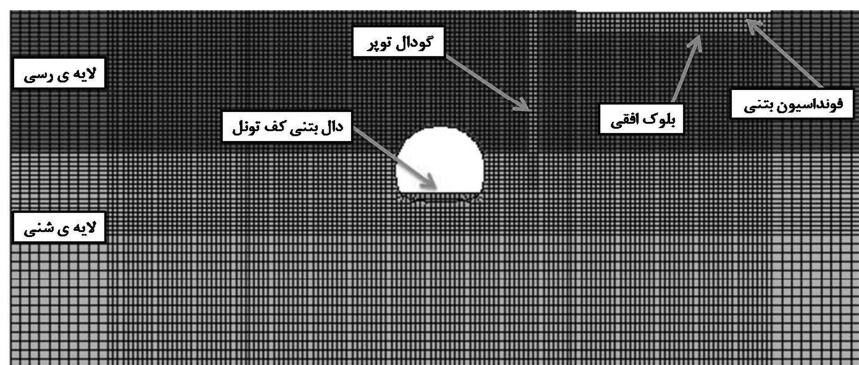
ناشی از وزن ساختمان بر روی فونداسیون افزایش می‌یابد و این افزایش در وزن ساختمان، باعث افزایش سطح تنش در خاک زیر فونداسیون می‌گردد.

پس با افزایش سطح تنش در خاک زیر فونداسیون، میزان ارتعاشات دریافتی در فونداسیون کاهش یافته است. پس به طور کلی میزان ارتعاشات دریافتی در فونداسیون ساختمان‌های سنگین‌تر، کمتر می‌باشد.

با استفاده از ثبت پاسخ تاریخچه زمانی سرعت قائم ذره ( $Y$  Velocity) در نقطه‌ی مرکزی فونداسیون ساختمان، اثر دو روش کاهنده‌ی ارتعاشات و همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. شکل (۷)، تاثیر وزن ساختمان در اثر افزایش طبقات در میزان دریافت ارتعاشات را برای سه حالت ۱، ۵ و ۱۰ طبقه نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که در اثر افزایش طبقات، بار



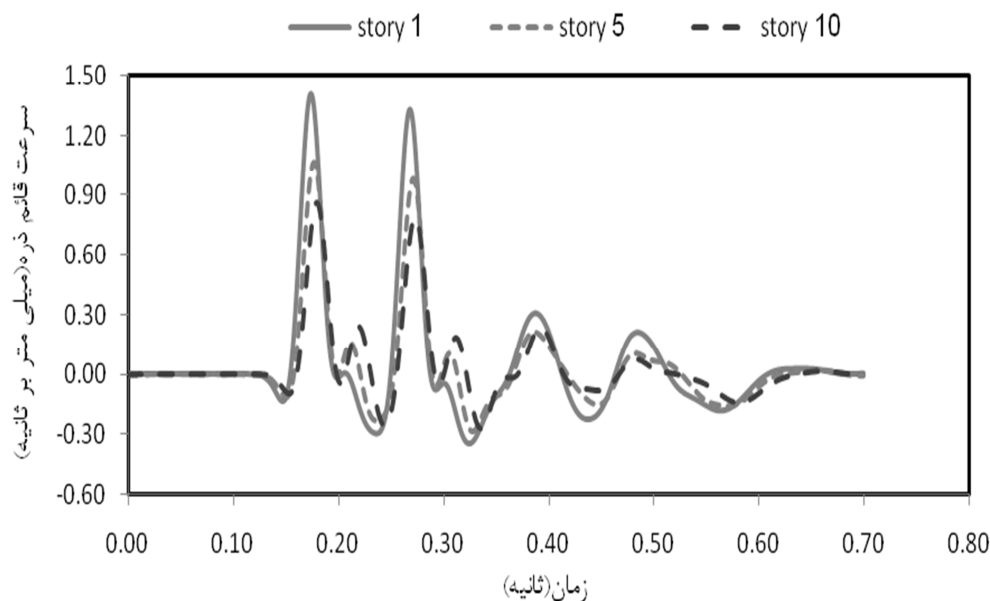


شکل ۶. جانمایی ترانشه توپر و بلوک افقی در نرم افزار FLAC

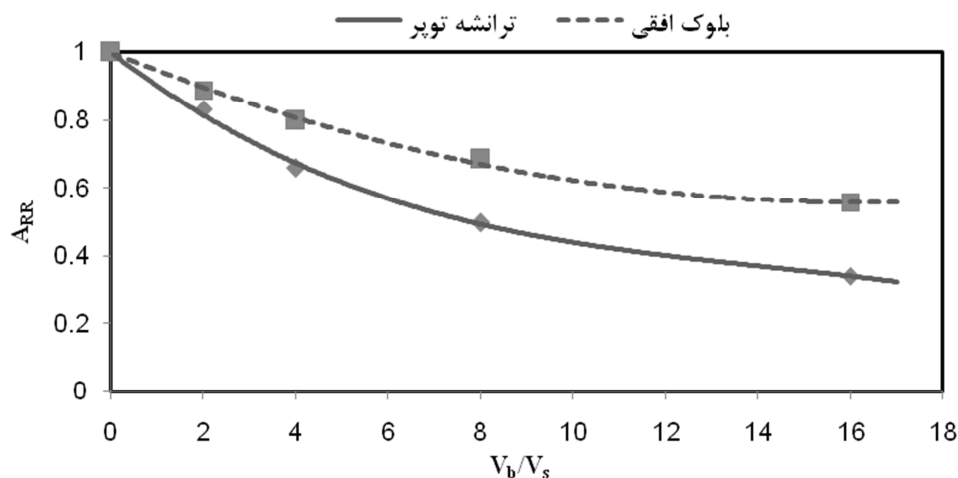
همانطور که ملاحظه می‌گردد، شکل (۸)، تاثیر سرعت موج برشی مصالح ترانشه‌های توپر و بلوک‌های افقی را در میزان کاهش ارتعاشات نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موج برشی مصالح موانع، در همه‌ی بررسی‌های صورت گرفته میزان پاسخ ارتعاشات کاهش یافته است. همچنین ملاحظه می‌شود که اثر افزایش سرعت موج برشی مصالح در کاهش میزان ارتعاشات، در ترانشه‌های توپر نسبت به بلوک‌های افقی تاثیرگذارتر است.

برای فراهم آوردن نتایج به صورت کلی و ایجاد امکان مقایسه و نمایش در گراف، ماکزیمم دامنه‌ی مربوط به پاسخ تاریخچه زمانی سرعت قائم و پارامترهای مربوط به موانع کاهش ارتعاش نرمالیزه شده است. با توجه به رابطه‌ی (۷) پارامتر نسبت کاهش دامنه  $ARR$ <sup>۱۳</sup> که نسبت دامنه ارتعاش با حضور موانع ( $A_I$ ) به دامنه ارتعاش بدون حضور موانع ( $A_0$ ) می‌باشد، توسط وودز<sup>۱۴</sup> (۱۹۶۸) و می و بولت<sup>۱۵</sup> (۱۹۸۲) بیان شده است (Murillo, Thorel and Caicedo, 2009):

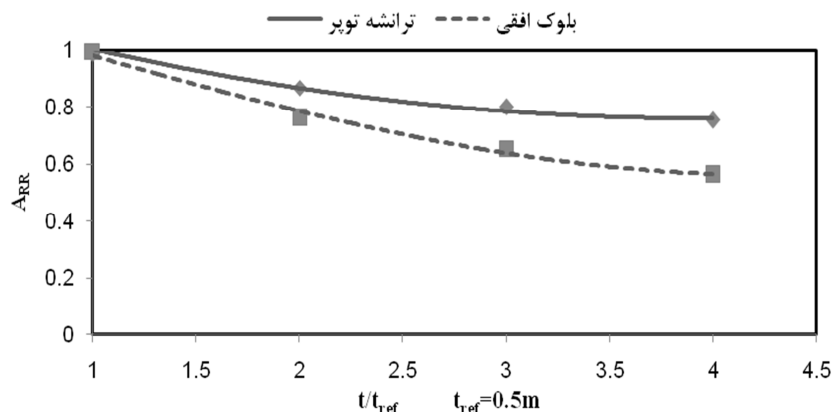
$$ARR = \frac{A_I}{A_0} \quad (7)$$



شکل ۷. تاثیر وزن ساختمان در اثر افزایش طبقات در میزان دریافت ارتعاشات



شکل ۸. تاثیر سرعت موج برشی مصالح موانع در میزان کاهش ارتعاشات



شکل ۹. تاثیر پارامتر ضخامت موانع با مصالح شماره ۴ جدول شماره (۳)، در میزان کاهش ارتعاشات

سطحی به کمک نرم افزار FLAC 5.0 مورد ارزیابی قرار گرفته است و ضمن معتبرسازی نرم افزار FLAC با نتایج مدل معتمد و همکاران (۲۰۱۰)، مدلسازی فونداسیون ساختمان، بار ناشی از طبقات، تونل مترو و خاک محیط اطراف آن، ترانشه‌ای توپر در فاصله‌ی ۱۰ متری از مرکز تونل و بلوکی افقی در زیر فونداسیون ساختمان به عنوان دو راهکار برای کاهش ارتعاشات، مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر به دست آمده است:

- در اثر افزایش تعداد طبقات ساختمان، سطح تنش در خاک زیر فونداسیون افزایش یافته و به موجب آن شدت ارتعاشات دریافتی در فونداسیون کاهش می‌یابد. پس به‌طور کلی میزان ارتعاشات دریافتی در فونداسیون ساختمان‌های سنگین‌تر، کمتر می‌باشد.

شکل (۹) نیز، تاثیر پارامتر ضخامت ترانشه‌های توپر و بلوک‌های افقی را با مصالح شماره ۴ (خاک متراکم<sup>۱۶</sup>) در میزان کاهش ارتعاشات را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در همه‌ی بررسی‌های صورت گرفته شده افزایش ضخامت موانع باعث کاهش در میزان ارتعاشات شده است. همچنین نتایج حاکی از آن است که اثر افزایش ضخامت در کاهش میزان ارتعاشات، در بلوک‌های افقی نسبت به ترانشه‌های توپر تاثیرگذارتر می‌باشد. ضخامت  $t=0/5$  متر به عنوان  $t_{ref}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به روش تفاضل محدود، روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از خطوط مترو بر سازه‌های

- Aiello V.; Boiero D.; D'Apuzzo M.; Socco L.V.; and Silvestri F.; (2008), "Experimental and numerical analysis of vibrations induced by underground trains in an urban environment", *Journal of Struct. Control Health Monit*; 15: pp. 315 – 348.
  - Beskos, D. E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I. G. (1986), "Vibration isolation using open or filled trenches—part 1: 2-D homogeneous soil," *Computational Mechanics*, vol. 1, No. 1, pp. 43–63.
  - Itasca Consulting Group. (2005), "Flac 5.0 User's Manual", Itasca Consulting Group: Minneapolis, MN.
  - Itoh K.; (2003), "Physical Modeling of Wave Propagation From Ground Vibration and Vibration Countermeasures", PhD Dissertation, Tokyo Institute of Technology.
  - Kuhlemeyer R.L.; and Lysmer J.; (1995), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*, 99(SM5), pp. 421–427.
  - Motamed R.; Itoh K.; Hirose S.; Takahashi A.; and Kusakabe, O. (2010) "Application of wave barriers as a countermeasure against train-induced ground vibrations", *Physical Modeling in Geotechnics – Spring man, Laue & Seward (eds)*, Taylor & Francis Group, London.
  - Murillo C.; Thorel L.; Caicedo B.; (2009), "Ground vibration isolation with geofoam barriers: Centrifuge modeling", *Journal of Applied Geotextiles and Geomembranes* 27, pp.423–434.
  - Unterberger W.; Poisel R.; and Honeger C.; (1997), "Numerical prediction of surface vibrations caused by high-speed rail traffic in tunnels", In: *Proceedings of the 23rd general assembly of the International Tunnelling Association*, Vienna, Austria, April 12-17, 1997.
  - XIA He.; CAO Y.; De Roeck.; and Degrande G.; (2007) "Environmental problems of vibrations induced by railway traffic", *Front. Archit. Civ. Eng. China*, 1(2): pp.142–152. 1.
  - Yang Y.B.; and Hung H H.; (2009), "Wave Propagation for Train-Induced Vibrations", *World Scientific Publishing*, Singapore.
  - Yang, Y.B. and Hung, H.H.; (2009), "A Parametric Study of Wave Barriers for Reduction of Train- Induced Vibrations," *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 40, pp.3729- 3747.
  - Yoshioka, O. "Basic Characteristics of Shinkansen-Induced Ground Vibration and its Reduction
- با افزایش سرعت موج برشی مصالح موانع ( $V_b$ )، در همه‌ی بررسی‌های صورت‌گرفته میزان پاسخ ارتعاشات کاهش می‌یابد و اثر افزایش سرعت موج برشی مصالح در کاهش میزان پاسخ ارتعاشات، در ترانشه‌های توپر نسبت به بلوک‌های افقی تا ۵۰ درصد تاثیرگذارتر است.
  - همچنین در بررسی اثر پارامتر ضخامت موانع ( $t$ ) نتایج نشان داد که افزایش ضخامت موانع باعث کاهش در میزان پاسخ ارتعاشات می‌شود و اثر افزایش ضخامت در کاهش میزان پاسخ ارتعاشات، در بلوک‌های افقی نسبت به ترانشه‌های توپر تا ۳۵ درصد تاثیرگذارتر می‌باشد.
- ۵- پی‌نوشت‌ها**
- 1- Filled Trench
  - 2- Wave Impedance Block :WIB
  - 3- Vienna
  - 4- Explicit Finite Difference
  - 5- Lograngian Analysis
  - 6- Barrier
  - 7- Timoshenko and Goodier
  - 8- Free Field
  - 9- Quiet
  - 10- Geometrical Damping
  - 11- Material Damping
  - 12- Itoh
  - 13- Amplitude Reduction Ratio
  - 14- Woods
  - 15- May and Bolt
  - 16- Soil compacted
- ۶- مراجع**
- معاونت تجهیز و بهره برداری؛ (۱۳۹۰)، "گزارش مفهومی خطوط ریلی"، سازمان قطار شهری کرج و حومه، تابستان.
  - مهندسین مشاور ایران خاک؛ (۱۳۹۱)، "خلاصه گزارش مطالعات مهندسی ژئوتکنیک پروژه قطار شهری کرج و حومه.
  - Adam M.; and von Estorff ,O.; (2005), "Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches", *Journal of Computers and Structures* 83, pp.11–24.

Simulations for Rayleigh Waves”, Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, American Society of Civil Engineers, 128 (3), pp. 250-261.

Measures,” Proceedings of International Workshop WAVE 2000, Balkema, Bochurn, 219-240.

- Zerwer A.; Cascante G.; and Hutchinson J.; (2008), “Parameter Estimation in Finite Element

- 
- <sup>1</sup> - Filled Trench
  - <sup>2</sup> -Wave Impedance Block :WIB
  - <sup>3</sup> -Vienna
  - <sup>4</sup> -Explicit Finite Difference
  - <sup>5</sup> -Lograngian Analysis
  - <sup>6</sup> -Barrier
  - <sup>7</sup> - Timoshenko and Goodier
  - <sup>8</sup> - Free Field
  - <sup>9</sup> - Quiet
  - <sup>10</sup> - Geometrical Damping
  - <sup>11</sup> - Material Damping
  - <sup>12</sup> - Itoh
  - <sup>13</sup> -Amplitude Reduction Ratio
  - <sup>14</sup> -Woods
  - <sup>15</sup> -May and Bolt
  - <sup>16</sup> -Soil compacted

---

## Evaluation of Reduction Methods of Vibrations Induced by Underground Railway on Surface Structures

*M. Hajimohammadi, M.Sc. Grad., Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*R. Porhosseini, Assistant Prof., Civil Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*M. H. Baziar, Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: hajimohammadi\_eng@yahoo.com*

Received: July 2016-Accepted: Nov. 2016

### Abstract

Due to the growing development of subway, reduction methods of propagated vibrations in ground and reduction of its disturbances in urban areas is of particular importance. In this study, besides modeling of building foundation, load of floors, subway tunnel and surrounding soil, the filled trench in distance of 10 m from tunnel center and wave impedance block under building foundation have been evaluated as two methods for vibration reduction. Also effect of building weight in amount of receiving vibrations has been studied for buildings with 1, 5 and 10 floors. First, a proper modeling of the problem and boundary conditions in wave propagation has been examined. Then for FLAC software validation, maximum acceleration attenuation of train at the ground level has been compared with data of Motamed et al. model (2010) that has been done with ABAQUS software. Finally effect of building weight and two parameters of filled trench and wave impedance block included of thickness and shear wave velocity in reduction of vibration on surface structures have been studied as numerical modeling by FLAC 5.0 software. The results shows that with increasing building weight, amount of received vibrations in foundation reduce due to increasing of stress level under building. In addition, with increasing shear wave velocity and thickness barriers increase rate of vibration reduction so that parameter of shear wave velocity in filled trench and thickness parameter in wave impedance block act more effective.

**Keywords:** Vibration Reduction; Underground Railway; Filled Trench; Wave Impedance Block; FLAC.