

# ارزیابی روش های کاهش ارتعاشات ناشی از خطوط مترو بر سازه های سطحی

محمد حاجی محمدی\*، 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

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

## چکیده

روشهای کاهش ارتعاشات منتشره در محیط زمین و کاهش مزاحمت های آن در مناطق شهری با توجه به توسعهی روز افزون مترو، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در تحقیق حاضر، ضمن مدلسازی فونداسیون ساختمان، بار ناشی از طبقات، تونل مترو و خاک محیط اطراف آن، ترانسه ای توپر در فاصله ی 10 متری از مرکز تونل و بلوکی افقی در زیر فونداسیون ساختمان به عنوان دو راهکار برای کاهش ارتعاشات، مورد ارزیابی قرار گرفته اند. همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات برای ساختمان های 1، 5 و 10 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 داده های مدل معتمد و همکاران (2010) 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 توپر و بلوک افقی شامل ضخامت و سرعت موج برشی در کاهش این ارتعاشات بر سازه های مجاور در سطح به صورت مدلسازی عددی توسط نرم افزار 5.0 FLAC مطالعه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش وزن ساختمان میزان ارتعاشات دریافت شده در فونداسیون به دلیل افزایش سطح تنش زیر ساختمان کاهش می یابد. علاوه بر این، افزایش در سرعت موج برشی و ضخامت موانع باعث افزایش در میزان کاهش ارتعاشات می شود به طوری که پارامتر سرعت موج برشی در ترانسه توپر و پارامتر ضخامت در بلوک افقی موثرتر عمل می کند.

کلمات کلیدی: کاهش ارتعاش؛ مترو زیر زمینی؛ ترانسه توپر؛ بلوک افقی؛ FLAC.

در سال های اخیر مسئله ی ارتعاشات ناشی از عبور و مرور قطار با گسترش و توسعه ی حمل و نقل ریلی در حال افزایش می باشد. 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 می باشد. اکثر کلان شهرها با توجه به توسعه ی روز افزون مترو و قطارهای سریع السیر داخل شهری با شکایات و مشکلات زیادی نسبت به ارتعاشات و لرزش های حاصل از خطوط ریلی در مناطق مسکونی، بیمارستان ها، آزمایشگاه ها و مراکز علمی با دقت بالا روبرو هستند و همواره در فکر کاهش و رفع این ارتعاشات و لرزش ها بوده اند (XIA et al., 2007).

برای کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطار در خاک، روش های گوناگونی در طول زمان های مختلف بسط و توسعه داده شده است. از معروفترین این روش ها می توان، احداث ترانشه ی توپر<sup>۱</sup> و بلوک افقی مانع موج<sup>۲</sup> اشاره نمود. روش احداث ترانشه به دو نوع توخالی و توپر از مصالح تقسیم می شود. بررسی اثرات روش ترانشه در کاهش ارتعاشات توسط وودز (1968)، لیسمر و واس (1972)، سیگل و همکاران (1978)، یانگ و هانگ (1997)، هانگ (2000) و هانگ و همکاران (2004) صورت گرفته است (Yang and Hung, 2009). ایده ی روش WIB، برگرفته از سنگ بستر طبیعی به عنوان مانعی در دفع و پخش ارتعاشات می باشد. پس با ایجاد سنگ بستری مصنوعی همچون تزریق سیمان داخل خاک در زیر ساختمان ها نیز می توان از اثر این ارتعاشات کاست. افرادی نظیر اشمید و همکاران (1991)، آنتس و ونستورف (1994)، تاکمیا و فوجی وارا (1994) و هانگ و همکاران (2004) روش WIB را بسط و توسعه دادند (Yang and Hung, 2009). ایزولاسیون ارتعاشات ناشی از مترو، موضوع مهمی در سال های اخیر می باشد. به طور کلی می توان با فراهم کردن یک مانع مناسب در برابر موج و محافظی بین منبع ارتعاش و سازه، از اثرات مضر این ارتعاشات جلوگیری کرد. با توجه به محدودیت هایی که برای کارهای آزمایشگاهی وجود دارد و فقط تعداد کمی مطالعات آزمایشگاهی برای راهنمای طراحی موجود می باشد، روش های 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 مدل های اجزا محدود (FEM)، المان مرزی (BEM) و تفاضل محدود (FDM) صورت گرفته است. آنتربرگر و همکاران نرم افزار FLAC را که بر مبنای روش تفاضل محدود است برای تجزیه و تحلیل ارتعاشات ناشی از خط متروی وینا<sup>۳</sup> به کار بردند (Unterberger, Poisel and Honeger, 1997). همچنین آیلو و همکاران نرم افزار دوبعدی FLAC 5.0 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 گرفت (Beskos, 1986). (Dasgupta and Vardoulakis, 1986). آدام و استروف اثر ترانشه ی توپر از بنتونیت و توخالی را در کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار برای ساختمان 6 طبقه به کمک آنالیز به روش دوبعدی FEM را بررسی کردند (Adam and Estorff, 2005). یانگ و هانگ با ترکیب روش المان محدود و المان نامحدود به بررسی اثر پارامترهای هندسی و مصالحی ترانشه ی توپر و توخالی و فونداسیون های 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 نرم افزار ABAQUS پرداختند (Motamed et al., 2010). با این وجود، کارهای کمتری بر روی اثر ترانشه ی 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 ترانشه ی توپر و WIB با مقاطع هندسی معادل، به عنوان روشهای کاهنده با رویکرد عددی توسط نرم افزار تفاضل محدود FLAC 5.0 می باشد. نرم افزار FLAC، نرم افزاری

<sup>1</sup> - Filled Trench

<sup>2</sup> - Wave Impedance Block :WIB

<sup>3</sup> -Vienna

است که روش عددی تفاضل محدود غیر ضمنی<sup>1</sup>، با تحلیل لاگرانژی<sup>2</sup>، را برای شبیه سازی مدل‌های خاک، سنگ و مدل‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌دهد (Itasca Consulting Group, 2005). این نرم‌افزار قادر است شرایط اجرایی و واقعی را به صورت مطلوبی شبیه سازی کند. در این بررسی، دو پارامتر هندسی از ترانسه‌ی توپر و WIB شامل سرعت موج برشی و ضخامت مطالعه شده‌اند. همچنین مدلی به عنوان مرجع، بدون هیچ مانعی<sup>3</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 1، 5 و 10 طبقه به صورت عددی بررسی شده است. لازم به ذکر است که پیش از این در مورد ارزیابی اثرات پارامترهای دو روش ترانسه‌ی توپر و بلوک افقی مانع موج (WIB) در خصوص 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.

## 2- مشخصات محیط انتشار امواج ومدلسازی در FLAC

مسئله مورد بررسی در این تحقیق، مقطع تونلی از مترو است که داخل محیطی دارای دو لایه ی مختلف از خاک قرار گرفته و بر روی سطح زمین، در مجاورت خط مترو، فونداسیون ساختمانی به همراه بار ناشی از 5 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 9 متر با لاینینگ بتنی به ضخامت 0/3 متر، دال کف به ضخامت یک متر و در عمق 17/5 متر از سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. فونداسیون ساختمان از جنس بتن، به طول 20 متر، ضخامت 1 متر، به فاصله ی 14 متر از مرکز تونل و 0/5 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 (1) نشان داده شده است.

به عنوان راهکارهایی برای کاهش ارتعاشات، ترانسه‌ای توپر در فاصله ی 10 متری از مرکز تونل و بلوکی افقی در زیر فونداسیون ساختمان به صورت موانعی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. ابعاد مقاطع ترانسه‌ی توپر و بلوک افقی معادل یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند تا بتوان بین این دو روش ایزولاسیون، مقایسه ی خوبی انجام داد. به دلیل این که طول فونداسیون ساختمان 20 متر در نظر گرفته شده و بلوک افقی در زیر فونداسیون قرار می‌گیرد، پس طول بلوک افقی در زیر فونداسیون برابر 20 متر در نظر گرفته می‌شود و به دلیل معادلسازی ابعاد هندسی دو روش ایزولاسیون، عمق ترانسه‌ی نیز برابر 20 متر قرار داده می‌شود. برای ارزیابی و مقایسه ی 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 5 طبقه بر روی فونداسیونی بتنی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات برای ساختمان‌های 1، 5 و 10 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.

جدول 1. مشخصات مصالح (مهندسین مشاور ایران خاک، 1391).

مخالص	وزن مخصوص خشک (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	مدول برشی (MPa)	C (KPa)	φ°
خاک رسی (16-0 متر)	1860	0/4	7/14	50	20
خاک درشت دانه شنی (40-16 متر)	2040	0/3	30/8	25	36
بتن فونداسیون، لاینینگ و دال کف تونل	2500	0/15	8700	-	-

<sup>1</sup> - Explicit Finite Difference

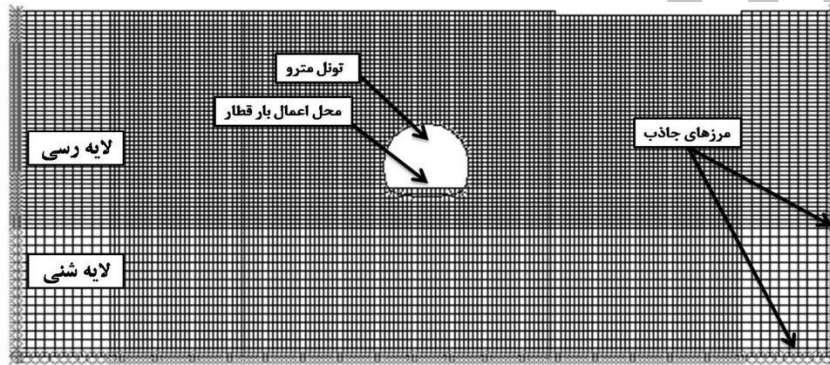
<sup>2</sup> - Lograngian Analysis

<sup>3</sup> -Barrier

با استفاده از نرم افزار دوبعدی FLAC 5.0 مدل تفاضل محدودی براساس مدل هندسی فرض شده مدلسازی شده است. شکل (1) مدلسازی صورت گرفته در نرم افزار FLAC را براساس پارامترهای هندسی که قبلا به آنها اشاره شده، نشان می دهد. در آنالیز دینامیکی با استفاده از روش های عددی، ممکن است در انتشار موج خطای عددی به وجود آید که این خطا تابع شرایط مدل سازی و ابعاد مش بندی می باشد. 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 (Kuhlemeyer and Lysmer, 1973) (1) کوتاهترین طول موج پیشنهاد کردند (رابطه ی 1).

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

که در آن  $\lambda$  طول موج رایلی،  $V_R$  سرعت موج رایلی،  $f_{max}$  بالاترین فرکانس موج وارده و  $\Delta L$  سایز المان می باشد. ما نیز در این مقاله بر طبق این پیشنهاد کوچکترین سایز المان را برابر 0/5 متر با توجه به سرعت موج رایلی زمین ( $V_R=61.96 \text{ m/s}$ ) و بالاترین فرکانس موج وارده (10 هرتز) اعمال شد.



شکل 1. مدل تفاضل محدود در نرم افزار FLAC

مدل صورت گرفته، مطابق شکل (1)، دارای ابعاد 88 متر در 40 متر می باشد. مشخصات مصالح در جدول (1) نشان داده شده است. المان ها به صورت 4 گره ای و خطی می باشند. سطح مشترک موجود در نرم افزار FLAC براساس لغزش کولمب یا جداشدگی کششی فرموله شده است. مشخصات سطح مشترک خاک و پوشش تونل شامل زاویه اصطکاک بین خاک و بتن  $\phi$  و چسبندگی بین خاک و بتن  $C$ ، سختی برشی  $K_s$  و سختی عمودی  $K_n$  می باشد. براساس روابط ارائه شده توسط تیموشنکو و گویدر<sup>1</sup> (2002) می توان این ضرایب سختی را به دست آورد (Itasca Consulting Group, 2005):

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

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

$$K_n = 7/91 \text{ E}8 \text{ Pa} \quad K_s = 1/37 \text{ E}10 \text{ Pa} \quad \phi = 14 \quad C = 33/33 \text{ kpa}$$

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 می دهد (Itasca Consulting Group, 2005). محاسبه ی نرخ افزایش زمان بستگی به سایز المان دارد که رابطه ی آن توسط زورر و همکاران به صورت زیر بیان می شود (رابطه ی 3) (Zerwer, Cascante and Hutchinson, 2002).

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

<sup>1</sup> - Timoshenko and Goodier

که  $\Delta L$  سایز المان،  $V_p$  سرعت موج حجمی،  $C$  برابر یا کوچکتر از یک و  $\Delta t$  نرخ افزایش زمان می باشد. در این مطالعه ماکزیمم نرخ افزایش زمان با توجه به پارامترهای فوق برابر 0/001 ثانیه بر طبق پیشنهاد زورر در نظر گرفته شده است. همانطور که مشخص است در آنالیزهای عددی، ابعاد و تعداد گره های مدل محدود در نظر گرفته می شوند، بنابراین روش های عددی به طور مستقیم قابل استفاده برای سیستم های نامحدود نیستند. از این رو روشی عمومی که به واسطه ی آن یک سیستم نامحدود می تواند توسط یک سیستم محدود تخمین زده شود مورد مطالبه است. در این مورد، کولمیر و لیسمر (1969) شرایط مرزی ویسکوز را پیشنهاد کردند که توانست بر این محدودیت روش های عددی غلبه کند (Itasca Consulting Group, 2005). مرزهای ویسکوز شامل میراگرایی هستند که به صورت مستقل، در جهات برشی و عمودی با مرزها در تماس هستند. میراگرها در حالت کششی نیز عمل می کنند که از روابط (4) محاسبه می شوند.

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

که در این روابط  $v_s$  و  $v_n$  به ترتیب مؤلفه های برشی و نرمال سرعت در مرز و  $\rho$  جرم مخصوص و می باشند. آنها شرایط مرزی ویسکوز را برای آنالیز مسائل دینامیکی دارای سیستم پیوسته نامحدود معرفی کردند. از این رو یک نیم فضای نامحدود می تواند به خوبی 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>1</sup> و خاموش<sup>2</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 می کند (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 می شود، یعنی موج میرا می شود. این موضوع منجر به کاهش تدریجی دامنه ی موج با توجه به مسافت پیموده، می شود. معمولاً میرایی به دو دسته ی (الف) میرایی هندسی<sup>3</sup> و (ب) میرایی مصالح<sup>4</sup> تقسیم بندی می شود. میرایی هندسی که ناشی از انتشار امواج می باشد، 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 می شود کاملاً الاستیک باشد، فقط میرایی هندسی باعث کاهش (میرایی) دامنه ی موج می شود. اما برای مصالحی که کاملاً الاستیک نیستند، نظیر خاک یا سنگ، میرایی مصالحی اتفاق می افتد. به این ترتیب، میرایی مصالحی با اتلاف انرژی (به علت اصطکاک) در مصالحی که امواج در آن انتشار پیدا می کنند اتفاق می افتد. نکته ی مهم در مدلسازی عددی توجه به میرایی مصالح می باشد. در مسائل حوزه زمان و بخصوص ارتعاشات حاصل از قطار، به دلیل ایجاد فرکانس های مختلف، معمولاً میرایی رایلی مورد استفاده قرار می گیرد که روی یک بازه محدود فرکانس، این میرایی تقریباً مستقل است. مؤلفه های ماتریس میرایی (C)، مطابق با رابطه ی (5) متناسب با جرم (M) و سختی (K) می باشد.

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

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 زاویه ای سیستم با استفاده از رابطه ی (6) تعیین می شود:

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

نسبت میرایی بحرانی به عنوان عامل میرایی بحرانی در مد  $i$  ام با فرکانس زاویه ای  $\omega_i$  بیان میشود. اگر چه تعیین میرایی محیط به راحتی امکان پذیر نیست، ولی براساس تجربه مقدار میرایی مصالح ژئوتکنیکی، 2 تا 5 درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته می شود. در بسیاری از مطالعات دینامیکی، فرکانس های حساس مربوط به ارتعاش در فرکانس طبیعی سیستم است، بنابراین لازم است تا فرکانس طبیعی

<sup>1</sup> - Free Field

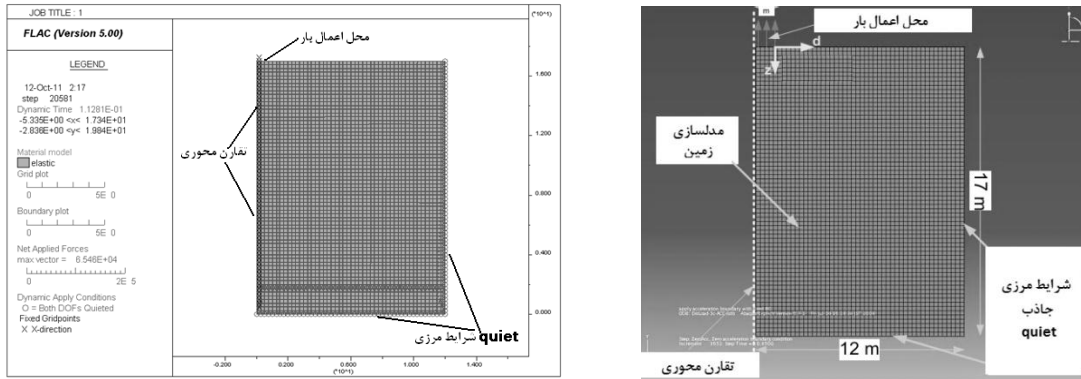
<sup>2</sup> - Quiet

<sup>3</sup> - Geometrical Damping

<sup>4</sup> - Material Damping

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 1/5 هرتز و نسبت میرایی برابر 5 درصد در نظر گرفته شده است.

حال به تصدیق و معتبرسازی مدل برای ارزیابی ارتعاشات ناشی از حرکت قطار می پردازیم. در این مطالعه، مدل معتمد و همکاران (2010) مطابق شکل (2-الف) برای تصدیق و معتبرسازی نتایج مدل تفاضل محدود انتخاب شده است.

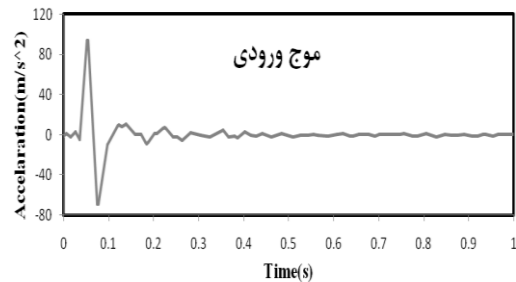
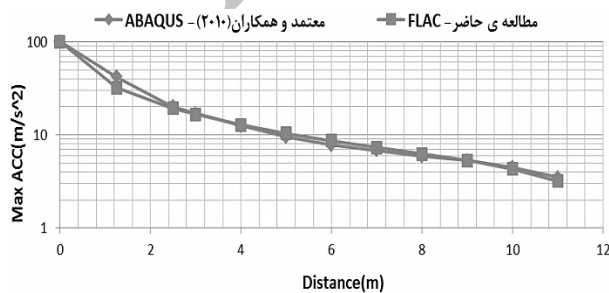


شکل 2: الف) مدل معتمد و همکاران (2010) در نرم افزار ABAQUS، ب) شبیه سازی مدل معتمد و همکاران (2010) در نرم افزار FLAC

مدل متقارن محوری، مطابق شکل (2-ب)، دارای ابعاد 12 متر در 17 متر می باشد. مشخصات مصالح زمین در جدول شماره (2) نشان داده شده است که بر طبق مدل معتمد و همکاران انتخاب شده است. این مدل براساس مدل سانتریفیوژ ایتوه<sup>1</sup> که برای اندازه گیری ارتعاشات حاصل از قطار طراحی شده بود، شبیه سازی شده است. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص این مدل می توانید به مرجع (Itoh, 2003) مراجعه نمایید. حال موج ورودی در مدل معتمد و همکاران (2010) به بالای مدل FLAC اعمال می شود (شکل 3). فرکانس این موج 10 هرتز می باشد تا در محدوده ی فرکانس ارتعاشات زمینی ناشی از حرکت قطار قرار گیرد (Yashioka, 2000). سپس میرایی ماکزیمم شتاب در سطح زمین ثبت می شود. شکل (4) مقایسه ی بین میرایی ماکزیمم شتاب در سطح زمین مدل اجزای محدود معتمد و همکاران در ABAQUS را با مدل تفاضل محدود در FLAC نشان می دهد. با توجه به شکل، نتایج تطابق بسیار خوبی را نشان می دهد و این گویای تصدیق و صحت عملکرد نرم افزار در مدرسی عددی می باشد.

جدول 2. مشخصات مصالح زمین (Itoh, 2003).

مصلح	مدول برشی (Pa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص خشک ( $\text{kg/m}^3$ )
خاک ( $D_r=80\%$ )	17900000	0/23	1543/5

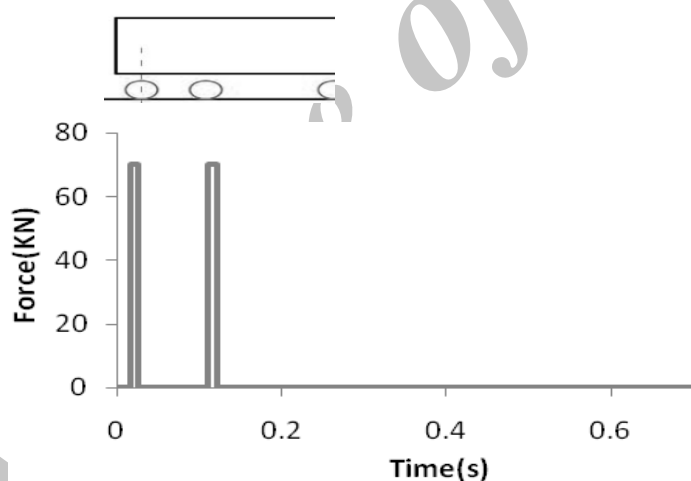


<sup>1</sup> - Itoh

شکل 3. موج ورودی اعمال شده در مدل معتمد وهمکاران (2010). شکل 4. مقایسه بین نتایج مدل FLAC و نتایج مدل معتمد وهمکاران (2010).

### 3- 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 تاریخچه 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 70 کیلو نیوتن و مدت زمان اعمال 10 میلی ثانیه می باشد، که بیانگر بارگذاری یک بوژی قطار مترو با بار محوری 140 کیلو نیوتن و سرعت 80 کیلومتر بر ساعت می باشد. فاصله زمانی 0/075 ثانیه بین دو پالس ناشی از فاصله ی بین چرخ های یک بوژی می باشد (معاونت تجهیز و بهره برداری، 1390). در این تحقیق تابع نیروی محاسبه شده با توجه به پارامترهای قطار متروی ایران، به عنوان تاریخچه نیرو به صورت دو بار نقطه ای همانطور که در شکل (5) 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.



شکل 5. تاریخچه زمانی بار اعمال شده در نرم افزار.

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 دهیم.

### 4-4- اثر ترانشه ها ی 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 (3) آمده است، در فاصله ی مشخص 10 متری از مرکز تونل، عمق ثابت 20 متری و ضخامت 0/5 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 ترانشه‌ی توپر با چهار حالت مختلف در ضخامت (2 و 1/5، 1، 0/5=t) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

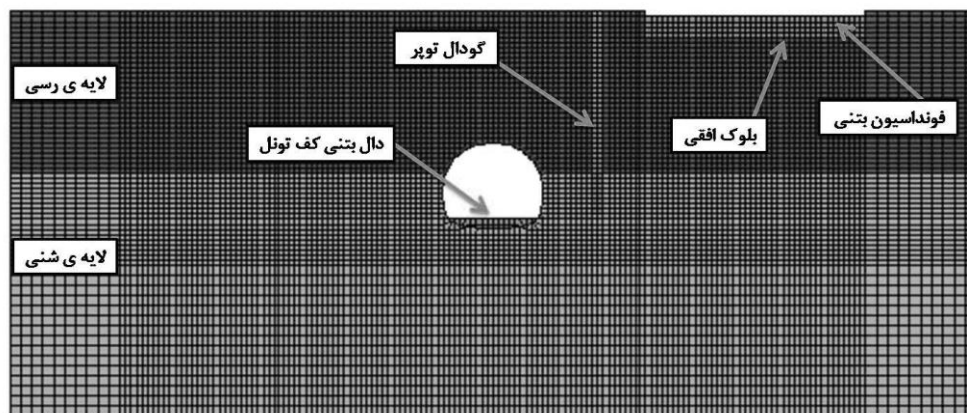
جدول 3. مشخصات مصالح موانع.

موانع	دانسیته (kgf/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	مدول برشی G <sub>b</sub> (Pa)	سرعت موج برشی مانع V <sub>b</sub> (m/s)	نسبت سرعت موج برشی مانع به سرعت موج برشی خاک رس (V <sub>b</sub> /V <sub>s</sub> )
1	2000	0/35	3E+7	123/98	2
2	2000	0/35	1/23E+8	247/95	4
3	2000	0/35	4/93E+8	496/28	8
4	2000	0/35	1/97E+9	991/63	16

همچنین هم اثر هندسه و هم اثر مشخصات مصالح بلوک‌های افقی به صورت یک مطالعه پارامتری نیز ارزیابی می‌شود. از لحاظ مصالح چهار نوع بلوک افقی با مصالحی یکسان با مصالح ترانشه‌ها، در زیر فونداسیون ساختمان، طول ثابت 20 متری و ضخامت 0/5 متری مورد بررسی قرار می‌گیرند. از لحاظ هندسی همانند روش ترانشه، مشخصات مصالح یک بلوک افقی با چهار حالت مختلف در ضخامت (2 و 1/5، 1، 0/5=t) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (6) مدلسازی ترانشه‌ی توپر و بلوک افقی را در نرم افزار FLAC نشان می‌دهد.

## 2-5- اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات

همانطور که قبلاً گفته شد در کلیه مدل‌های فوق فونداسیون ساختمانی به همراه بار ناشی از 5 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 10 طبقه نیز تغییر می‌دهیم و برای سه حالت 1، 5 و 10 طبقه، میزان ارتعاشات دریافتی را بررسی می‌کنیم. به طور کلی در بارگذاری، وزن یک مترمربع از هر طبقه‌ی ساختمان 1 ton/m<sup>2</sup> فرض شده است.



شکل 6: جانمایی ترانشه توپر و بلوک افقی در نرم افزار FLAC

## 3- بررسی نتایج عددی

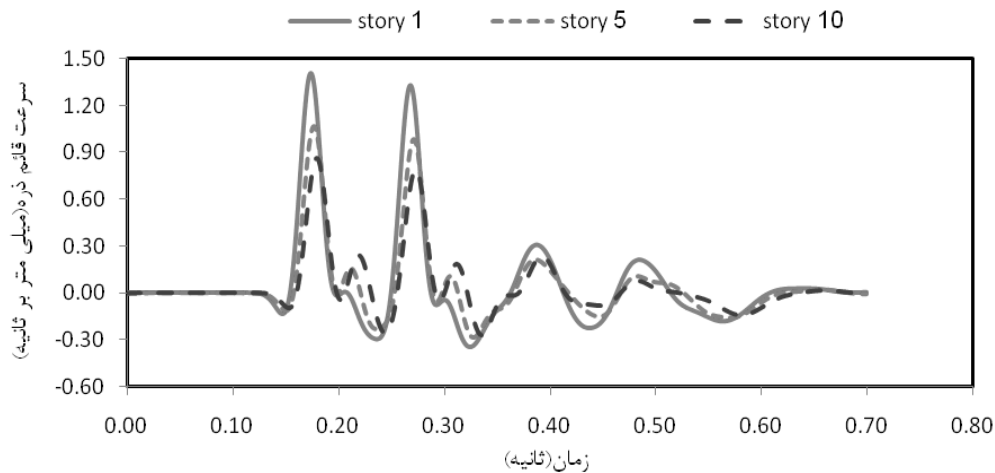


با استفاده از ثبت پاسخ تاریخیچه زمانی سرعت قائم ذره (Y Velocity) در نقطه ی مرکزی فونداسیون ساختمان، اثر دو روش کاهنده ی ارتعاشات و همچنین اثر وزن ساختمان در میزان دریافت ارتعاشات مورد ارزیابی قرار گرفته اند. شکل (7)، تاثیر وزن ساختمان در اثر افزایش طبقات در میزان دریافت ارتعاشات را برای سه حالت 1، 5 و 10 طبقه نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که در اثر افزایش طبقات، بار ناشی از وزن ساختمان بر روی فونداسیون افزایش می یابد و این افزایش در وزن ساختمان، باعث افزایش سطح تنش در خاک زیر فونداسیون می گردد. 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 ساختمان های سنگین تر، کمتر می باشد.

برای فراهم آوردن نتایج به صورت کلی و ایجاد امکان مقایسه و نمایش در گراف، ماکزیمم دامنه ی مربوط به پاسخ تاریخیچه زمانی سرعت قائم و پارامترهای مربوط به موانع کاهش ارتعاش نرمالیزه شده است. با توجه به رابطه ی (7) پارامتر نسبت کاهش دامنه  $A_{RR}$  که نسبت دامنه ارتعاش با حضور مانع  $A_1$  به دامنه ارتعاش بدون حضور مانع  $A_0$  می باشد، توسط وودز<sup>2</sup> (1968) و می و بولت<sup>3</sup> (1982) بیان شده است (Murillo, Thorel and Caicedo, 2009):

$$A_{RR} = \frac{A_1}{A_0} \quad (7)$$

همانطور که ملاحظه می گردد، شکل (8)، تاثیر سرعت موج برشی مصالح ترانسه های توپر و بلوک های افقی را در میزان کاهش ارتعاشات نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با افزایش سرعت موج برشی مصالح موانع، در همه ی بررسی ها ی صورت گرفته میزان پاسخ ارتعاشات کاهش یافته است. همچنین ملاحظه می شود که اثر افزایش سرعت موج برشی مصالح در کاهش میزان ارتعاشات، در ترانسه های توپر نسبت به بلوک های افقی تاثیر گذارتر است.

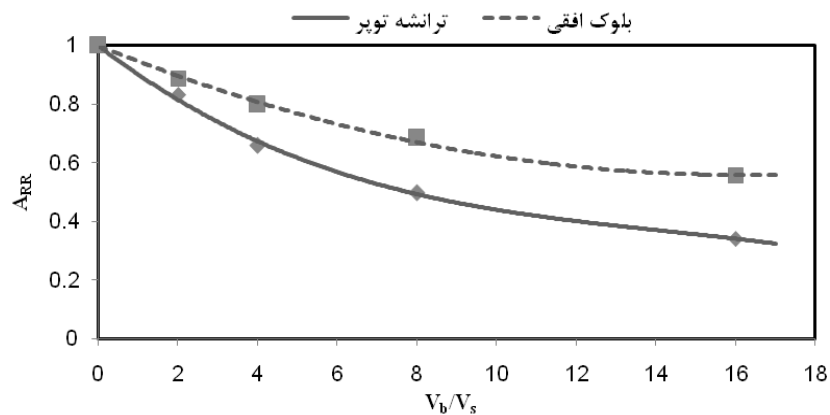


شکل 7: تاثیر وزن ساختمان در اثر افزایش طبقات در میزان دریافت ارتعاشات.

<sup>1</sup> -Amplitude Reduction Ratio

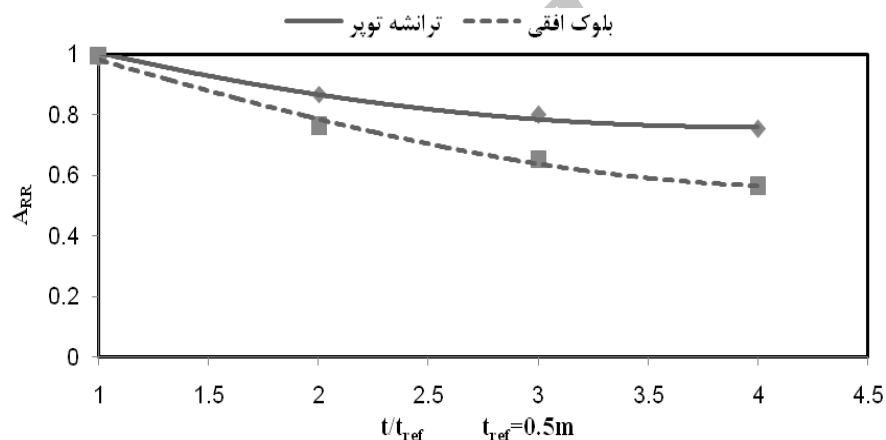
<sup>2</sup> -Woods

<sup>3</sup> -May and Bolt



شکل 8: تاثیر سرعت موج برشی مصالح موانع در میزان کاهش ارتعاشات.

شکل (9) نیز، تاثیر پارامتر ضخامت ترانشه‌های توپر و بلوک‌های افقی را با مصالح شماره 4 (خاک متراکم<sup>1</sup>) در میزان کاهش ارتعاشات را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در همه ی بررسی های 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 بلوک های افقی نسبت به ترانشه های توپر تاثیرگذارتر می باشد. ضخامت  $t=0/5$  متر به عنوان  $t_{ref}$  در نظر گرفته شده است.



شکل 9: تاثیر پارامتر ضخامت موانع با مصالح شماره 4 جدول شماره (3)، در میزان کاهش ارتعاشات.

#### 4- نتیجه گیری

در این مطالعه، به روش تفاضل محدود، روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از خطوط مترو بر سازه های 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 (2010)، مدل‌سازی فونداسیون ساختمان، بار ناشی از طبقات، تونل مترو و خاک محیط اطراف آن، ترانشه‌های توپر در فاصله‌ی 10 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 بدست 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 می یابد. پس به طور کلی میزان ارتعاشات دریافتی در فونداسیون ساختمان‌های سنگین‌تر، کمتر می‌باشد.

<sup>1</sup> -Soil compacted

- با افزایش سرعت موج برشی مصالح موانع ( $V_b$ )، در همه ی بررسی ها ی صورت گرفته میزان پاسخ ارتعاشات کاهش می یابد و اثر افزایش سرعت موج برشی مصالح در کاهش میزان پاسخ ارتعاشات، در ترانشه های توپر نسبت به بلوک های افقی تا 50 درصد تاثیرگذارتر است.
- همچنین در بررسی اثر پارامتر ضخامت موانع ( $t$ ) نتایج نشان داد که افزایش ضخامت موانع باعث کاهش در میزان پاسخ ارتعاشات می شود و اثر افزایش ضخامت در کاهش میزان پاسخ ارتعاشات، در بلوک های افقی نسبت به ترانشه های توپر تا 35 درصد تاثیرگذارتر می باشد.

## 5- مراجع

- معاونت تجهیز و بهره برداری؛ "گزارش مفهومی خطوط ریلی"، سازمان قطار شهری کرج و حومه، تابستان، 1390.
- مهندسین مشاور ایران خاک؛ "خلاصه گزارش مطالعات مهندسی ژئوتکنیک پروژه قطار شهری کرج و حومه"، آبان 1391.
- Adam M.; and von Estorff O.; "Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches", Journal of Computers and Structures 83, 11–24, 2005.
- Aiello V.; Boiero D.; D'Apuzzo M.; Socco L.V.; and Silvestri F.; "Experimental and numerical analysis of vibrations induced by underground trains in an urban environment", Journal of Struct. Control Health Monit; 15:315 – 348, 2008.
- Beskos, D. E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I. G. "Vibration isolation using open or filled trenches—part 1: 2-D homogeneous soil," Computational Mechanics, vol. 1, no. 1, pp. 43–63, 1986.
- Itasca Consulting Group. "Flac 5.0 User's Manual", Itasca Consulting Group: Minneapolis, MN, 2005.
- Itoh K.; "Physical Modelling of Wave Propagation From Ground Vibration and Vibration Countermeasures", PhD Dissertation, Tokyo Institute of Technology, 2003.
- Kuhlemeyer R.L.; and Lysmer J.; "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, 99(SM5), 421–427, 1973.
- Motamed R.; Itoh K.; Hirose S.; Takahashi A.; and Kusakabe, O. "Application of wave barriers as a countermeasure against train-induced ground vibrations", Physical Modelling in Geotechnics – Springman, Laue & Seward (eds), Taylor & Francis Group, London, 2010.
- Murillo C.; Thorel L.; Caicedo B.; "Ground vibration isolation with geofoam barriers: Centrifuge modeling", Journal of Applied Geotextiles and Geomembranes 27, 423–434, 2009.
- Unterberger W.; Poisel R.; and Honiger C.; "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.; "Environmental problems of vibrations induced by railway traffic", Front. Archit. Civ. Eng. China, 1(2): 142–152. 1, 2007.
- Yang Y.B.; and Hung H H.; "Wave Propagation for Train-Induced Vibrations", World Scientific Publishing, Singapore, 2009.
- Yang, Y.B. and Hung, H.H.; "A Parametric Study of Wave Barriers for Reduction of Train- Induced Vibrations," International Journal for Numerical Methods in Engineering 40, 3729- 3747, 1997.
- Yoshioka, O. "Basic Characteristics of Shinkansen-Induced Ground Vibration and its Reduction Measures," Proceedings of International Workshop WAVE 2000, Balkema, Bochurn, 219-240, 2000.

- Zerwer A.; Cascante G.; and Hutchinson J.; "Parameter Estimation in Finite Element Simulations for Rayleigh Waves", Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, American Society of Civil Engineers, 128 (3), 250-261, 2002.

Archive of SID