

ارزیابی ارتعاشات حاصل از حرکت قطارهای مترو به روش تجربی

(مطالعه موردی در اهواز)

رسول مهدی زاده¹

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-خاک و پی دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده:

با افزایش روز افزون جمعیت شهرها و پیشرفت چشمگیر علم و فناوری، تقاضای افراد برای آسایش و زندگی راحت تر نیز افزایش یافته است. ترافیک‌های شهری و کمبود فضا و مکان مناسب برای تفریح یا پارک وسایط نقلیه، نیاز به استفاده از فضاهای زیرزمینی را بیش از پیش ضروری نموده است.

یکی از مهمترین نکات قابل توجه در زمان بهره‌برداری از خطوط مترو، آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از اصوات، ارتعاشات و نوفه‌های حاصل از حرکت مترو می‌باشد. حضور اصوات و ارتعاشات متناوب در محیط، سلامت روحی افراد را به خطر انداخته، منجر به افسردگی و خستگی طولانی می‌شود. این ارتعاشات که یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های مربوط به مناطق نزدیک به سیستم‌های حمل و نقل می‌باشد، می‌تواند باعث آزدگی افراد ساکن در حریم خطوط مترو، ارتعاش ساختمان‌ها و ایجاد خطا در تجهیزات حساس به ارتعاش و نیز شنیده شدن صداهای ناهنجار و آزار دهنده در فضای داخلی ساختمان‌ها گردد.

در این تحقیق پارامترهای مؤثر و میزان تأثیری که هر یک از آنها بر میزان ارتعاشات ایجاد شده دارند، به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از روش تجربی، ارتعاشات مترو در شهر اهواز پیش‌بینی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های نوین برای کاهش ارتعاشات ایجاد شده، سطح ارتعاشات را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.

کلید واژه‌ها: آلودگی ارتعاشی، مترو، روش تجربی، کاهش ارتعاشات

¹ mehdizadeh250@gmail.com

۱. مقدمه

استفاده از قطارهای زیرزمینی مترو به عنوان وسیله‌ای سریع و مطمئن، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاهش ترافیک شهری و حمل و نقل سریع مسافران باشد. از طرفی حرکت متروها با سرعت مناسب در حد فاصل بین ایستگاه‌ها موجب ایجاد ارتعاشات هر چند خفیف، اما گاهی اوقات آزار دهنده برای افراد ساکن در حریم خطوط مترو می‌شود. این ارتعاشات می‌تواند باعث ارتعاش ساختمان‌ها و نیز شنیده شدن صداهای ناهنجار و آزار دهنده در فضای داخلی ساختمان‌ها گردد.

علاوه بر سلب آرامش انسان، این ارتعاشات می‌تواند اثرات نگران کننده‌ای بر روی سازه‌ها و تاسیسات موجود به ویژه ساختمان‌های باستانی داشته و نیز باعث ایجاد خطا در تجهیزات حساس به ارتعاش و برخی مشکلات دیگر گردد. لذا در طراحی خطوط ریلی جدید، ارزیابی ارتعاشات ناشی از حرکت قطار، یکی از پارامترهای مهم در انتخاب مسیر و نوع سیستم ریلی محسوب می‌شود.

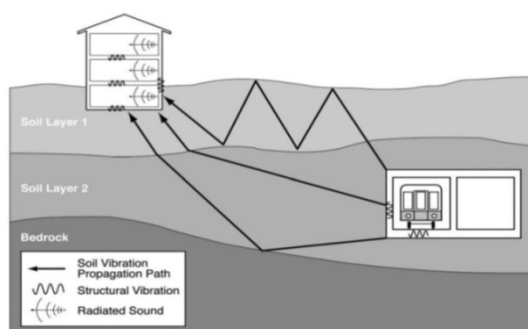
ارزیابی دقیق ارتعاشات ناشی از عبور متروها نیازمند فراهم بودن اطلاعات کامل از جزئیات سیستم حمل و نقل، زمین‌شناسی محل و نیز سایر اطلاعات مربوط به تولید و انتشار ارتعاشات از مترو به داخل ساختمان‌ها می‌باشد. ولی به علت فراهم نبودن اطلاعات کافی در مراحل اولیه طراحی یک سیستم مترو و یا ناقص بودن اطلاعات موجود، استفاده از روش‌های تجربی بسیار مفید و کارگشا خواهد بود. در این روش می‌توان با استفاده از فرمول‌ها، جداول و روابطی که بر حسب تجربه و با انجام آزمایش‌های گوناگون به دست آمده‌اند به تخمینی مناسب برای میزان ارتعاشات القایی زمین دست یافته و سپس میزان ارتعاشات بدست آمده را با حدود مجاز استاندارد مقایسه نمود.

در این تحقیق قصد داریم ارتعاشات حاصل از حرکت قطارهای زیرزمینی متروی شهر اهواز در سطح زمین را با استفاده از روش تجربی مورد بررسی قرار داده و تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان ارتعاشات ایجاد شده را ارزیابی نماییم. قابل ذکر است که پروژه مذکور در زمان انجام این تحقیق در مراحل اولیه اجرایی قرار دارد، لذا در برخی از مراحل فرآیند پیش‌بینی ارتعاشات، از مفروضاتی مناسب و مستدل استفاده شده است.

۲. مفاهیم اساسی ارتعاشات زمین، ناشی از حرکت قطارهای شهری

ارزیابی دقیق ارتعاشات ایجاد شده در حین عبور قطارهای زیرزمینی مستلزم شناخت و آگاهی کامل از عواملی است که میزان ارتعاشات ایجاد شده در زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. لذا لازم است که فرآیند ایجاد ارتعاشات در حین عبور قطار، پارامترهای مؤثر و میزان تأثیری که هر یک از آنها در میزان ارتعاشات ایجاد شده دارند، به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. این ارتعاشات در ساختمان‌ها باعث حرکات محسوس کف طبقات، لرزش و صدای ناهنجار پنجره‌ها، لرزش اجسام قرار گرفته در قفسه‌ها و همچنین تولید صدای غرش‌گونه در داخل اتاق‌ها می‌شوند.

به طور کلی می‌توان گفت که مبحث ارتعاشات ناشی از عبور قطارهای مترو شامل سه بخش اساسی می‌باشد که عبارتند از منبع ارتعاش، مسیر انتقال امواج و گیرنده ارتعاشات. این سه بخش به طور شماتیک در شکل (۱) نمایش داده شده است. آگاهی از اینکه هر یک از سه بخش چگونه بر میزان ارتعاشات تأثیر گذارند در پیش‌بینی و کاهش این ارتعاشات بسیار موثر است.



شکل شماره ۱: انتشار ارتعاشات ناشی از حرکت قطارهای زیر زمینی در زمین و نحوه انتقال آن به ساختمان‌ها

۲-۱. منبع ارتعاش: چرخ‌های قطار با حرکت بر روی ریل‌ها ایجاد انرژی ارتعاشی نموده که از سیستم ریل و سیستم نگهدارنده آن به سازه تونل منتقل می‌شوند. در واقع این بخش شامل تمامی پارامترهایی است که مربوط به عملکرد قطار و نیز مسیر حرکت قطار می‌باشد. پارامترهایی از قبیل سرعت، سیستم تعلیق قطار، میزان زبری سطح ریل و چرخ‌ها و سیستم تکیه-گاهی ریل همگی بر میزان ارتعاشات ایجاد شده تاثیر گذارند. ریل‌های درزدار، ریل‌های ناصاف و ضربه چرخ‌ها بر ریل، همگی باعث افزایش شدید در میزان ارتعاشات ایجاد شده در منبع می‌شوند.

فوجی کاکه در سال ۱۹۸۶ ایجاد ارتعاشات ناشی از ضربه چرخ‌ها در حین عبور از درز انقطاع ریل و انتشار این ارتعاشات در زمین را مورد مطالعه قرار داد. طبق مطالعات وی ماکزیمم ایجاد شده در نگاشت ارتعاشی زمین در لحظه عبور چرخ از روی درز انقطاع رخ می‌دهد که در این لحظه صدای شدیدی نیز شنیده می‌شود (فوجی کاکه^۱، ۱۹۸۶، ص ۳۵۷).

دگرند و همکاران نیز در سال ۲۰۰۶ با اندازه‌گیری ارتعاشات بر روی ریل و نیز بر روی محور چرخ‌های قطار مشاهده نمودند که ضربه ایجاد شده در حین عبور چرخ از روی درز انقطاع ریل، با افزایش سرعت قطار به طور خطی افزایش می‌یابد به طوری که با دو برابر شدن سرعت قطار، ارتعاش ایجاد شده ۴ تا ۵ دسی‌بل افزایش یافته است (دگرند و همکاران^۲، ۲۰۰۶، ص ۶۲۶).

۲-۲. مسیر انتشار امواج: پس از تولید ارتعاشات در منبع، این ارتعاشات در محیط اطراف منتشر می‌شوند. شرایط خاک و لایه‌های تحتانی زمین تأثیر بسیار زیادی بر سطح ارتعاشات زمین دارند. از جمله مهمترین پارامترها، سختی و میرایی درونی خاک، فاصله تا سنگ بستر، لایه‌بندی خاک و نیز عمق سطح آب زیرزمینی می‌باشند. تجربه نشان می‌دهد که انتشار ارتعاشات در خاک‌های رسی سفت و سنگ بستر کم‌عمق بسیار مؤثرتر است و به نظر می‌رسد که با تمرکز انرژی ارتعاشی در سطح زمین در فواصل دور از مرکز ریل نیز ارتعاشات زمین قابل توجه می‌باشند. تونل‌هایی که در سنگ حفاری می‌شوند ارتعاشات کمتری در نزدیکی تونل ایجاد می‌کنند و از طرفی به علت پخش و انتشار مؤثر، سطح ارتعاش به سرعت لایه‌های خاکی در بسترهای سنگی مستهلک نمی‌شود (سازمان حمل و نقل آمریکا^۳، ۲۰۰۶).

لایه‌های بودن خاک نیز تأثیری بسیار مهم ولی غیر قابل پیش‌بینی بر سطح ارتعاشات دارد. چرا که هر لایه می‌تواند مشخصات دینامیکی متفاوت و مهمی داشته باشد. بنابراین در حین ارزیابی ارتعاشات با استفاده از روش‌های عددی و کامپیوتری در نظر گرفتن کلیه لایه‌های خاک موجود در محل هر چند با ضخامت کم می‌تواند منجر به ارزیابی دقیق‌تر گردد. وجود آب زیرزمینی می‌تواند تأثیر زیادی بر وضعیت ارتعاشات زمین داشته باشد. اما تا بحال رابطه معین و مشخصی در این مورد ارائه نشده است (سازمان حمل و نقل آمریکا، ۲۰۰۶).

۲-۳. گیرنده ارتعاشات: پس از تولید ارتعاشات در مسیر ریل و انتشار در مسیر میانی، ارتعاشات توسط فونداسیون ساختمان‌های مجاور دریافت می‌گردد. سپس این ارتعاشات از فونداسیون به سایر اجزاء ساختمان منتقل می‌شود. ساختمان گیرنده ارتعاش یکی از اجزاء کلیدی در ارزیابی ارتعاشات زمین می‌باشد، چرا که مشکل‌زا بودن ارتعاشات زمین در داخل ساختمان اتفاق می‌افتد. ارتعاشات قطار ممکن است برای افرادی که در خارج از ساختمان قرار دارند، قابل حس باشد اما به ندرت ارتعاشات خارج از ساختمان باعث آزار و اذیت انسان می‌گردد. سطح ارتعاشات درون ساختمان، به انرژی ارتعاشی که فونداسیون ساختمان دریافت می‌کند، اتصال و اندرکنش فونداسیون ساختمان و خاک و نیز انتشار ارتعاشات در داخل ساختمان بستگی دارد. به عنوان یک قانون کلی می‌توان گفت که ساختمان سنگین‌تر پاسخ کمتری به انرژی دریافتی خواهد داد.

¹ Fujikake

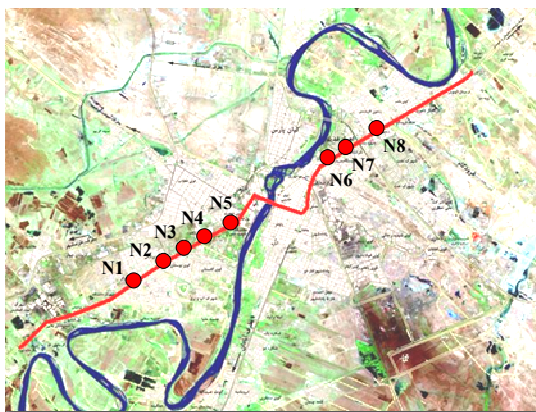
² Degrande et al.

³ US Department of Transportation

نلسون در سال ۱۹۸۷، پاسخ ساختمان به ارتعاشات را با در نظر گرفتن تأثیر نوع فونداسیون بر انتقال ارتعاشات از زمین به ساختمان و انتشار ارتعاشات در ساختمان را مورد بحث و بررسی قرار داد. وی بیان نمود که در ساختمان‌های چند طبقه مقدار معمول کاهش ارتعاشات از یک طبقه به طبقه بعد در فرکانس‌های بالا حدود، ۳ دسی‌بل می‌باشد (نلسون^۱، ۱۹۸۷).
 فیلا و همکاران نیز در سال ۲۰۰۷ با ارائه یک مدل عددی سه بعدی، ارتعاشات و اصوات منتشر شده در ساختمان را مورد ارزیابی قرار داده و بیان نمودند که در صورتی که سختی خاک، نسبت به سختی ساختمان بیشتر باشد، صرفه نظر کردن از اندرکنش دینامیکی سازه و خاک و تحریک مستقیم فونداسیون انعطاف پذیر، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد (فیلا و همکاران^۲، ۲۰۰۷، ص ۷۱۸)

۳. معرفی پروژه قطار شهری اهواز

چنانکه در شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود، مسیر خط ۱ قطار شهری اهواز بطول تقریبی ۲۳ کیلومتر، شمال شرقی شهر را با عبور از بخش مرکزی شهر و رودخانه کارون به جنوب غربی شهر متصل می‌نماید. این مسیر از نیروگاه زرگان در بخش شمالی آغاز شده و با حرکت در مسیر بلوار پاسداران و عبور از میدان‌های فرودگاه، دروازه، دانشگاه و کارگر در پارکینگ جنوبی خاتمه می‌یابد. عمق تونل در طول مسیر حدود ۱۲ متر از سطح زمین و قطر تونل ۶ متر می‌باشد.
 اطلاعات مربوط به شرایط خاک در مسیر مترو بر مبنای گزارشات ژئوتکنیک شرکت کیسون (مجری طرح) تامین شده است. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته می‌توان از دیدگاه زمین‌شناسی گمانه‌های انتخابی در طول مسیر را به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول، گمانه‌های مربوط به نیمه شمالی مسیر بوده که متشکل از لایه‌های ریزدانه رسی و سلیتی در لایه‌های فوقانی بوده و سنگ بستر که متشکل از مارن‌های قرمز رنگ و لای سنگ و ماسه‌سنگ است در عمق بسیار کمی قرار دارد. بخش دوم گمانه‌های نیمه جنوبی مسیر می‌باشند که به علت عملکرد گسل اهواز، سنگ بستر افتادگی قابل توجهی داشته و در این گمانه‌ها تا عمق حدود ۴۰ متر سنگ بستر در زیر آبرفت‌های جوان و بعضاً کم تراکم قرار می‌گیرد.



شکل شماره ۲: شمایی از مسیر متروی شهر اهواز

۴. پیش‌بینی و تحلیل تجربی ارتعاشات مترو

مرکز تحقیقات حمل و نقل آمریکا تحقیقات جامعی پیرامون ارتعاشات ناشی از ترافیک وسایل نقلیه انجام داده است. گزارش ارائه شده توسط این مرکز با نام "ارزیابی اصوات و ارتعاشات ناشی از ترافیک"^۳ در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است. این گزارش یکی از جامع‌ترین منابع در زمینه لرزش‌های ناشی از ترافیک وسایل نقلیه است (سازمان حمل و نقل آمریکا، ۲۰۰۶).

¹ Nelson

² P. Fiala et. al.

³ Transit noise and vibration Impact assessment

روش تجربی ارائه شده در این بخش بر اساس مفاهیم و روش‌های پیشنهادی ارائه شده توسط سازمان حمل و نقل آمریکا می‌باشد. در این روش ابتدا بر اساس موقعیت و شرایط محل مورد نظر، حد مجاز ارتعاشات را تعیین نموده و سپس در یک ارزیابی اولیه فاصله حساس به ارتعاشات^۱ از منبع بار را تعیین می‌کنیم. به عبارت دیگر فاصله‌ای از محور ریل که در آن ارتعاشات در محدوده مجاز قرار دارند مشخص می‌گردد. در صورتی که فاصله محل مورد نظر تا محور ریل (فاصله قطری) از مسافت تعیین شده بیشتر باشد، می‌توان بیان نمود که ارتعاشات ایجاد شده در آن محل مشکل‌ساز نخواهند بود و نیازی به بررسی دقیق‌تر نیست. ولی در صورتی که محل مورد نظر در داخل مسافت حساس قرار گرفته باشد، لازم است تا با انجام مطالعاتی دقیق‌تر وضعیت ارتعاشی آن محل تعیین گردد. در این صورت با استفاده از منحنی‌های ارائه شده می‌توان سطح ارتعاش در محل مورد نظر را به طور دقیق‌تر ارزیابی نمود. البته این ارزیابی بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده در پروژه‌هایی دیگر با شرایطی متفاوت می‌باشد؛ لذا برای اعمال شرایط پروژه حاضر در ارتعاشات ارزیابی شده لازم است که یک سری ضرایب اصلاحی در آن اعمال گردد. بدین روش می‌توان ارتعاشات موجود در یک محل نزدیک به مسیر مترو را به روش تجربی ارزیابی نمود. در صورتی که سطح ارتعاشات محاسبه شده بیش از حد مجاز باشد، لازم است تا با استفاده از روش‌های دقیق‌تر مانند استفاده از مدل‌سازی عددی وضعیت ارتعاشی آن محل به طور دقیق‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد.

۵. ارزیابی ارتعاشات به روش تجربی در پروژه قطار شهری اهواز

برای ارزیابی تجربی ارتعاشات، ابتدا با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در گزارش سازمان حمل و نقل آمریکا، سطح ارتعاشات را در فاصله مورد نظر از محور ریل قرائت نموده و سپس برای اعمال شرایط موجود در پروژه مورد نظر، اعداد اصلاحی مورد نیاز، بدان اعمال می‌گردد.

با در نظر گرفتن نقاطی واقع بر سطح زمین به فواصل $0.0m$ ، $1.0m$ ، $2.0m$ و $3.0m$ از محور مرکزی تونل و استفاده از منحنی ارائه شده، سطح ارتعاشات اولیه در این نقاط را بدست می‌آوریم.

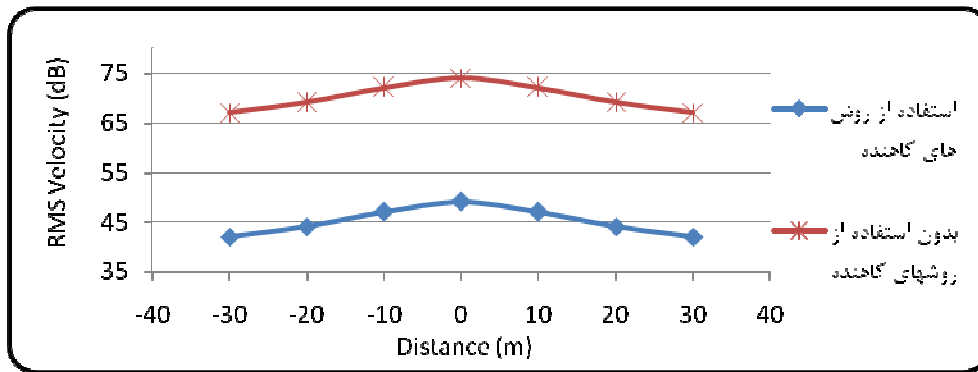
حال با استفاده از جداول مربوط به ضرایب اصلاحی و در نظر گرفتن شرایط موجود در پروژه متروی اهواز، ارتعاشات اولیه را اصلاح می‌نماییم. با در نظر گرفتن سرعت 80 کیلومتر بر ساعت (50 مایل بر ساعت) ضریب اصلاح مربوط به سرعت حرکت قطار صفر خواهد بود. همچنین با توجه به جدید الاحداث بودن مسیر، در صورت استفاده از چرخ‌های ارتجاعی و ریل‌های جوش شده، اعداد اصلاحی مربوط به وسیله نقلیه و شرایط ریل نیز صفر در نظر گرفته می‌شود.

به منظور کاهش ارتعاشات ایجاد شده در حین عبور قطار، پیشنهاد شده که از سیستم دال شناور، بست‌های ریلی با خاصیت ارتجاعی بالا و نیز بست‌های تکیه‌گاهی ارتجاعی استفاده گردد. در این صورت عدد اصلاحی مربوط به استفاده از دال شناور $15dB$ - و کاهش ارتعاش در اثر استفاده از بست‌های ریلی با خاصیت ارتجاعی بالا، $5dB$ - خواهد بود، که طبق دستور العمل ارائه شده تنها $15dB$ - را در نظر می‌گیریم. همچنین برای بست‌های تکیه‌گاهی ارتجاعی به اندازه $10dB$ کاهش در ارتعاشات خواهیم داشت.

در صورتی که تونل در سنگ حفاری شود ارتعاشات ایجاد شده به اندازه $10dB$ کاهش خواهد یافت. بنابراین عدد اصلاحی برای بخش شرقی مسیر $10dB$ - و برای بخش غربی صفر خواهد بود. همچنین برای ایستگاه‌های شرقی به خاطر انتشار مؤثر ارتعاشات $10dB$ + افزایش در ارتعاشات خواهیم داشت.

مجموع اعداد اصلاحی برای بخش شرقی مسیر $25dB$ - ($25 = -10 - 10 - 10 - 15$) و برای بخش غربی نیز $25dB$ - ($25 = -10 - 10$) خواهد بود. باتوجه به یکسان بودن اعداد اصلاحی برای بخش شرقی و غربی مسیر، با اعمال $25dB$ - بر ارتعاشات اولیه، میزان ارتعاش اصلاح شده در فواصل مختلف از محور ریل بدست می‌آید. نتایج بدست آمده در شکل (۳) نمایش داده شده است.

¹ Screening Distances



شکل شماره ۳: ارزیابی تجربی ارتعاشات سطح زمین در فواصل مختلف از محور ریل (دسی بل)، در طول مسیر متروی شهر اهواز - سرعت قطار = ۸۰ کیلومتر بر ساعت

با دقت در شکل (۳) که منحنی ارتعاشات سطح زمین در فواصل مختلف از محور ریل می باشد، می توان اثر قابل توجه استفاده از روش های نوین برای کاهش ارتعاشات ایجاد شده در حین عبور قطار را مشاهده نمود.

۶. نتیجه گیری و پیشنهادات

با استفاده از روش تجربی ارائه شده در این تحقیق، سطح ارتعاشات ایجاد شده در طول مسیر متروی شهر اهواز با فرض استفاده از روش های نوین برای کاهش ارتعاشات، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد که استفاده همزمان از سیستم دال شناور، بست های ریلی با خاصیت ارتجاعی بالا و نیز بست های تکیه گاهی ارتجاعی، سطح ارتعاشات را به مقدار قابل توجهی کاهش می دهد.

حداکثر ارتعاش ارزیابی شده در طول مسیر مترو، بر روی سطح زمین، درست روی محور ریل، ۴۹ دسی بل بوده است که از حد ادراک انسان (۶۵ دسی بل) هم پایین تر است.

بنابراین چنین به نظر می رسد که در صورت استفاده از روش های کاهش ارتعاش در طول مسیر متروی شهر اهواز میزان ارتعاشات ایجاد شده در حین عبور قطارهای مترو کمتر از حد مجاز می باشند و به لحاظ زیست محیطی مشکل ساز نخواهند بود.

پیشنهاد می گردد که در زمان بهره برداری از خط متروی شهر اهواز، با ابزارگذاری در تراز ریل و نیز در سطح زمین و همچنین در طبقات مختلف چند ساختمان که در مجاورت مسیر مترو قرار دارند، نحوه انتقال ارتعاشات ایجاد شده به داخل ساختمان و نیز شدت اصوات ایجاد شده در اثر ارتعاش سطوح داخلی ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته، در صورت لزوم راهکاری مناسب برای کاهش آنها ارائه گردد.

۷. مراجع

1. Degrande, G. et al. (2006), [Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored embedded in London clay], *Journal of Sound and Vibration*, 293, pp. 626–644
2. Fiala, P., Degrande, G., Augusztinovicz, F. (2007), [Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic], *Journal of Sound and Vibration*, 301, pp. 718–738
3. Fujikake, T. (1986), [A Prediction Method for the Propagation of Ground Vibration from Railway Trains], *Journal of sound and vibration*, 111(2), pp. 357-360.
4. Nelson, P. M. (1987), [Transportation Noise Reference Book], Butterworth & Co. Ltd.
5. US Department of Transportation report (2006), [Transit Noise and Vibration Impact Assessment], FTA-VA-90-1003-06, Washington, DC 20503, USA.