

بررسی میدانی اثر نوفه و ارتعاش بر ساختمان‌های مجاور مترو تأثیر پارامترهای تعمیر و نگهداری

مقاله علمی - پژوهشی

محمدحسن اسماعیلی*، استادیار، گروه مهندسی راه آهن و برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل

دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

سیدجواد میرمحمد صادقی، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مسعودنصرآزادانی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سعید معتمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.h.esmaeili@eng.ui.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۵۰۸-۴۹۱

چکیده

اثرات نوفه و ارتعاش به عنوان یکی از مشکلات شهروندان ساکن کلان شهرها در سال‌های اخیر به یک موضوع پرچالش تبدیل شده است. هر چند نوفه و ارتعاش در شهرها از منابع متعددی منبعث می‌گردد، آنجا که منبع تولید کننده نوفه و ارتعاش دائمی باشد، اثر سوء آن دوچندان خواهد بود. سیستم حمل و نقل ریلی درون شهری یک منبع دائمی تولید نوفه و ارتعاش در داخل شهرها است، که می‌بایست تمهید مناسبی جهت رفع اثرات آن اندیشیده شود. با وجود اهمیت این موضوع تا کنون مطالعات کافی در این خصوص صورت نگرفته و این مساله منجر به شکایت مردم در خطوط در حال بهره برداری مترو شده است. تحقیق پیش رو با هدف بررسی و ارزیابی اثرات نوفه و ارتعاش حاصل از خطوط مترو بر اساس مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها انجام گرفته است. بر این اساس مقادیر ارتعاش و نوفه به عنوان نمونه در دو مقطع دارای مشکل و سابقه ارتعاش در مترو تهران ثبت و ارزیابی شده است. بررسی انجام شده نشان می‌دهد که همبستگی بالایی میان خرابی‌های ایجاد شده در محل قوس با مقادیر ارتعاش وجود دارد. در بخش‌های با خطوط مستقیم مقدار همبستگی میان خرابی‌های خط و ارتعاش و نوفه به میزان قابل توجهی کم تر از محدوده قوس می‌باشد. در خصوص قوس‌های مختلف همبستگی میان خرابی‌های سطح ریل و ارتعاش در مقادیر شعاع بالای ۷۰۰ متر قابل توجه نمی‌باشد. بر اساس این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که اعمال شعاع قوس با شعاع کم تر از ۷۰۰ متر در خطوط مترو می‌تواند تأثیرات بالایی بر ارتعاش داشته باشد. لذا توصیه می‌گردد در طراحی خطوط مترو از شعاع قوس کم تر از ۷۰۰ متر اجتناب گردد.

واژه‌های کلیدی: نوفه، ارتعاش، قوس تنگ، تست‌های میدانی، خرابی‌های روسازی

۱- مقدمه

علت این مساله را می‌توان از یک طرف به مواردی چون افزایش تراکم منازل مسکونی در مجاورت خطوط ریلی، افزایش سالیانه خطوط ریلی درون شهری، افزایش میزان توجه مردم به بناهای

معضل نوفه و ارتعاش یکی از مباحث پر ارجاع در ادبیات موضوع مهندسی راه آهن است (شرکت بهره برداری مترو تهران، ۱۳۸۸ و معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۷).

۲- سوابق معضل نوفه و ارتعاش در مترو تهران

بهره برداری از اولین خط مترو تهران در سال ۱۳۷۷ در خطی که امروز به عنوان خط ۵ شناخته می شود حداقل ایستگاه های تهران صادقیه و کرج آغاز گردید، از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۴۰۳ مجموع طول خطوط نزدیک ۳۰۰ کیلومتر رسیده است (بدون احتساب خطوط دپو). به عبارتی به طور متوسط در هر سال ۱۱/۵ کیلومتر خط مترو در کلان شهر تهران ساخته شده است. نوع سیستم خطوط، حمل و نقل ریلی سنگین HRT است، که بار محوری آن در محدوده ۱۶ تن قرار دارد. خطوط مترو تهران عمدتاً به صورت زیرزمینی اجرا شده است. عمق تونل در خطوط شمالی - جنوبی شهر تا ۶۰ متر و در خطوط شرعی - غربی تا ۳۰ متر می باشد. شیب و فراز خطوط نیز در محدوده ۱ تا ۵ درصد بوده و مسیر نیز عمدتاً دارای قوس های افقی ۲۵۰ متر تا ۱۰۰۰۰ متر می باشد. سیستم روسازی خطوط مترو تهران عمدتاً از نوع دالخط رهدا با پابندی معروف به پابند "تیپ چینی" است. هرچند در طراحی های اولیه خطوط مترو تهران در اکثر بخش های مسیر استفاده از فرش ارتجاعی زیر دال دیده شده بود، و لیکن در فرآیند اجرا به علل مختلف فرش ارتجاعی از داخل طرح روسازی حذف گردید. در حال حاضر تمهیدات کاهنده ارتعاشات تنها در بخش های محدودی از خطوط چون مترو مصلی (استفاده از تراورس با پد پلی پورتان)، فرهنگسرا (فرش زیر دال)، محدوده مرکز قلب تهران (استفاده از پابند ارتجاعی و نگارد) استفاده شده است. به جز چند مقطع اشاره شده در فوق، در ساختار سایر خطوط، تنها المان کاهنده ارتعاشات سیستم پابند "تیپ چینی" می باشد. این پابند شامل مجموعه ای از ادوات پلیمری و فولادی می باشد، که طراحی آن توسط موسسه تحقیق و طراحی مهندسی شهری پکن، انجام گرفته است. شکل ۱ نمونه ای از ادوات سیستم پابند فوق را نمایش می دهد.

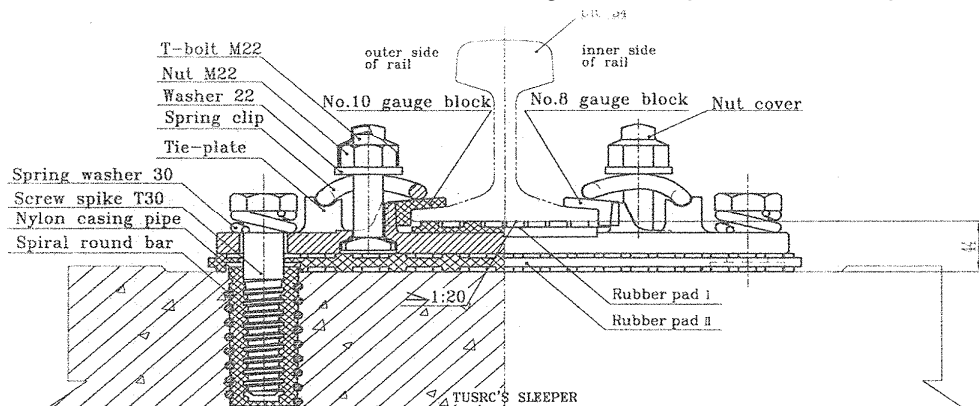
تاریخی (معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۸) و در آخر عدم توجه سازندگان مترو به مسائل زیست محیطی منتسب نمود. عامل آخر به خصوص در خطوط مترو ایران عامل پررنگ تری است، به این علت که توجه سازندگان مترو عموماً به توسعه کمی و ارزان خطوط بوده است، این امر منجر به تولید مقادیر نوفه و ارتعاش زیاد شده است. اولین بار چالش فوق در ایران تقریباً اندکی پس از بهره برداری از خط ۱ مترو تهران مورد توجه قرار گرفته است، و همزمان نیز در دانشگاه های کشور مطالعات و ارزیابی هایی در جهت حل این معضل آغاز گردیده است. به عنوان یکی از اولین تلاش ها، مطالعات انجام شده توسط شرکت بهره برداری مترو تهران در سال ۱۳۸۸ می باشد، که اثرات نوفه و ارتعاش در قالب ۶ گزارش تفصیلی در محدوده خطوط ۱ و ۲ مترو تهران انجام گرفت (شرکت بهره برداری مترو تهران، ۱۳۸۸). بخش دیگری از مطالعات نوفه و ارتعاش در محدوده میانی خط ۱ مترو اصفهان حداقل سال های ۱۳۹۴ الی ۱۳۹۷ انجام گرفت (معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۷). نتیجه این مطالعات منجر به اجرای سیستم کاهنده ارتعاش جهت محافظت ابنیه تاریخی و فرهنگی در قسمت میانی مترو اصفهان گردید. در سال ۱۳۹۸ نیز مطالعاتی توسط مترو تبریز در محدوده مسجد کبود انجام شد (معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۸). تمامی مطالعات فوق موید لزوم بازنگری در مطالعات ارزیابی نوفه و ارتعاش می باشد. مطالعه پیش رو ماحصل نمونه ای از اندازه گیری های ارتعاش و نوفه است که در خطوط مترو تهران با تاکید بر اثرات تعمیر و نگهداری انجام گرفته است.



شکل ۱. قطعات نمونه پابند تیپ چینی مورد استفاده در اکثر مقاطع خطوط مترو تهران

(با عنوان پد زیر ریل) و قطعه دیگر در زیر زینچه (به عنوان پد زیر زینچه)، قرار گرفته است. پیچ های اشاره شده با تنظیم نیروی پیش بار (از طریق گشتاور پیچشی وارد شده بر پیچ در زمان بستن پابند)، نقش مهمی در عملکرد ارتعاشی پابند ایفا می کنند. به عبارتی اعمال زیاد تر از حد و یا اعمال کم تر از مقدار بهینه برای پیش بار در مقدار کاهش ارتعاش پابند تاثیر گذار خواهد بود.

مقطع پابند نمایش داده شده در شکل ۱ و کلیه ادوات آن در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است. جزئیات هر یک از ادوات در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ملاحظه می گردد، تعداد ۱۴ المان در داخل این پابند استفاده شده است. مکانیزم کاهش نیروهای دینامیکی (و متعاقب آن کاهش ارتعاش)، توسط دو قطعه لاستیکی کلروپرن و تنظیم مقدار پیش فشردگی توسط دو پیچ T30 و پیچ و مهره T-T-bolt-M22 انجام می گیرد. یکی از قطعات لاستیکی در زیر ریل



شکل ۲. مقطع نمونه پابند تیپ چینی مورد استفاده در اکثر مقاطع خطوط مترو تهران و قطعات آن مطابق جدول شماره ۱

گشتاور پیچشی مشخصی داشته باشند، لذا جهت نصب می بایست حتما موتور پیچ بند ترک-متر دار استفاده نمود. مطابق نظر سازنده مقدار گشتاور پیچشی در بازه ۱۵۰ تا ۲۰۰ نیوتن. متر در محل خط مستقیم و قوس های با شعاع بیشتر از ۸۰۰ متر، و در محل قوس های با شعاع کم تر از ۸۰۰ متر می بایست برابر ۲۰۰ تا ۲۵۰ نیوتن. متر در نظر گرفته شود. گنج بلاک نیز یکی از

به جهت عملکرد مناسب ارتعاشی تنها نوع پابند نیست که بر روی عملکرد آن تاثیر گذار می باشد، بلکه چگونگی نصب آن نیز موضوعی حائز اهمیت است. به عنوان نمونه در خصوص پابند فوق نکات متعددی را در زمان نصب می بایست توجه نمود. اول اینکه پیچ های T30 می بایست قبل از قرار گرفتن در داخل رول پلاک گریس کاری گردند. این پیچ ها همچنین باید مقدار

سختی پابند فوق در مقایسه با سایر پابندها توسط آزمایشگاه راه آهن دانشگاه اصفهان اندازه گیری شده است (آزمایشگاه مهندسی راه آهن دانشگاه اصفهان، ۱۴۰۲).

نتایج در دو فرکانس ۵ و ۱۰ هرتز در جدول شماره ۳ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، مقدار متداول در خطوط مترو تهران، در بازه ۱۹ تا ۲۰ کیلونیوتن بر میلی متر است (ردیف ۶ جدول را ملاحظه نمایید)، که شرایطی بهتر از پابندهایی چون W14 یا پابند بیسپلیت دار با پد زیر ریل NR دارد. بر اساس مقدار سختی اندازه گیری شده، پابند مذکور در محدوده پابندهای ارتجاعی قرار می گیرد (پابند فوق ارتجاعی دارای سختی کمتر از ۱۰ کیلونیوتن بر میلی متر، پابند ارتجاعی در محدوده ۱۰ تا ۳۰ کیلونیوتن بر میلی متر و پابند معمولی صلب مقدار سختی بیش از ۳۰ کیلو نیوتن بر میلی متر دارد).

قطعات مهم این پابند است، که به منظور تنظیم عرض خط در بازه ۶- میلی متر تا ۴+ میلی متر استفاده می گردد. در زمان نصب جایگذاری اشتباه آنها با عث ایجاد لقی و ضربات زیاد و نهایتا ایجاد ارتعاش می گردد. همانگونه که در جدول شماره ۲ ملاحظه می گردد، به عنوان نمونه در خصوص پابند فوق بایستی شماره گیج مورد نظر را مطابق جدول در بخش داخلی و خارجی ریل قرار داد. به عنوان مثال در صورتی که عرض خط دقیقا برابر ۱۴۳۵ باشد، و نیاز به اصلاح عرض خط نیز نباشد می بایست در خارج ریل از گیج بلاک نمره ۱۰ و در داخل آن از نمره ۸ استفاده نمود. یک علامت Δ نیز بر روی صفحه زینچه قرار دارد، که در همه حالات می بایست به سمت داخل ریل قرار گرفته باشد. لازم به توضیح است که مقدار گشتاور پیچشی پیچ T-bolt-M22 نیز بر روی عملکرد پد زیر ریل نیز تاثیر گذار است. از این جهت مقدار گشتاور پیچشی آن می بایست با استفاده از موتور پیچ بند ترک متر دار به درستی تنظیم گردد. در پابند فوق مقدار این گشتاور مطابق توصیه سازنده در بازه ۱۰۰ تا ۱۲۰ نیوتن.متر تنظیم می گردد.

جدول ۱. مشخصات فنی ۱۴ قطعه مورد استفاده در پابند خطوط مترو تهران - مطابق نقشه شکل ۲

ردیف	آیتم	وزن واحد (kg, cm ³)	تعداد در هر ست	نوع ماده
۱	Tie-plate	10.50	۱	KTH350-10
۲	T-bolt M22	0.294	۲	Q235-A
۳	Nut M22	0.150	۲	Q235-A
۴	Washer 22	0.072	۲	Q235-A
۵	Spring clip	0.452	۲	60SZMn
۶	No.8-gauge block	34.95 (cm ³)	۱	Nylon
۷	No.10-gauge block	38.02 (cm ³)	۱	Nylon
۸	Screw spike T30	0.976	۲	Q235-A
۹	Spring washer 30	0.121	۲	60SZMn
۱۰	Rubber pad I	185.45 (cm ³)	۱	Chloroprene Rubber
۱۱	Rubber pad II	879.8 (cm ³)	۱	Chloroprene Rubber
۱۲	Nylon casing pipe	0.198	۲	Nylon
۱۳	Spiral round bar	0.391	۲	Q235-A86 round bar
۱۴	Nut cover	3.07 (cm ³)	۲	Nylon

جدول ۲. انواع گیج بلاک های موجود در پابند تیپ چینی مترو تهران، و مقدار تنظیم عرض ایجاد شده در صورت استفاده از آنها

ردیف	مقدار تنظیم عرض مورد نیاز (میلی متر)	تعداد گیج بلاک در بخش بیرونی ریل	تعداد گیج بلاک در بخش داخلی ریل
۱	۰	۱۰	۸
۲	+۲	۸	۱۰
۳	+۴	۶	۱۲
۴	-۲	۱۲	۶
۵	-۴	۱۰	۸
۶	-۶	۱۲	۶

جدول ۳. سختی دینامیکی اندازه‌گیری شده برای انواع سیستم پابند- تست شده در آزمایشگاه راه‌آهن دانشگاه اصفهان

ردیف	نام پابند	سختی دینامیک (KN/mm)	
		۵ هرتز	۱۰ هرتز
۱	W14 - پد زیر ریل HDPE*	۸۸	۱۰۰
۲	W14 - پد زیر ریل NR دکمه‌ای	۳۶	۳۸
۳	بیس پلیت دار چهار سوراخه - فنر SKL1 - پد زیر بیس پلیت و پد زیر ریل HDPE	۳۵	۴۱
۴	بیس پلیت دار چهار سوراخه- فنر SKL1 - پد زیر ریل NR دکمه ای - پد زیر بیس پلیت HDPE	۲۶	۳۰
۵	بیس پلیت دار چهار سوراخه- فنر SKL1 - پد زیر ریل HDPE - پد زیر بیس پلیت NR دکمه‌ای	۲۴	۲۸
۶	بیس پلیت دار چهار سوراخه- فنر SKL1 - پد زیر ریل NR دکمه‌ای - پد زیر بیس پلیت NR دکمه‌ای	۱۹	۲۰
۷	بیس پلیت دار چهار سوراخه - فنر SKL1 - پد زیر ریل NR دکمه‌ای - پد زیر بیس پلیت لاستیک طبیعی مسطح	۱۸	۲۰
۸	بیس پلیت دار چهار سوراخه - فنر SKL1 - پد زیر بیس پلیت پلی اورتان	۱۲	۱۳
۹	بیس پلیت دار چهار سوراخه - فنر SKL1 - پد زیر بیس پلیت پلی اورتان	۹	۱۰
۱۰	پابند فوق ارتجاعی	۵	۸

HDPE: High density polyethylene

از سال ۱۳۹۱ تا سال ۱۴۰۳ تعداد شکایات در خطوط مختلف افزایش یافته است. جدول شماره ۴ تعداد شکایات‌ها به تفکیک خطوط در مترو تهران را نمایش می‌دهد، همانگونه که ملاحظه می‌گردد در حالت کلی نزدیک به ۲۶ نقطه شکایت از خطوط رصد شده است. پراکنده جغرافیایی نقاط شکایت در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد نقاط در سراسر خطوط در حال بهره برداری پراکنده شده‌اند.

معضل نوفه و ارتعاش به صورت شکایت رسمی ساکنین تقریباً از سال ۱۳۹۰ در خطوط مترو تهران رخ داده است. در طی این سال‌ها شکایات‌ها دارای اشکال مختلف بوده است. ساکنین اطراف خطوط شکایت خود را در قالب اظهارات مختلفی کتباً به مسئولین ارسال داشته‌اند. به عنوان نمونه یکی از اظهارات مربوط به نیمه شمالی خط ۱ به شرح زیر می‌باشد.

"برادر ارجمند جناب آقای مهندس ... مدیرعامل محترم شرکت متروی تهران؛ با سلام؛ پیش از آنکه شکایت نزد داور برم، از شما که دست‌اندرکار راه‌اندازی و توسعه خطوط مترو برای آسایش مسافران هستید یاری می‌خواهیم. خانه ما در جایی قرار گرفته است که خط ... مترو از بلوار ... به خیابان ... می‌پیچد. همه روزه از صبح حدود ساعت ۴:۳۰ به صدای حرکت قطار بیدار می‌شویم و تا پس از ساعت ۲۳:۳۰ که رفت و آمد متوقف می‌شود، به طور مرتب صدای قطار و لرزش آن را با تمام وجود درک و لمس می‌کنیم؛ صدا چنان است که گویی رعد و برق بسیار تیزی می‌خروشد و لرزش چنان که گویی زلزله چند ریشتری در و دیوار، حتی سقف خانه را می‌کوبد. نه راه فراری هست و نه امید پناهگاهی، نه آرامشی و نه آسایشی. برای تجربه عملی می‌توانید بازرسی را تعیین فرمایید تا ۲۴ ساعت مهمان ما باشد و صرف گفتار با عمل ثابت شود، در پایان یادآور می‌شود که به تجربه دریافته‌ایم هنگامی که دو قطار روبروی هم در حرکت‌اند، گویی دنیا می‌خواهد به آخر برسد. لرزش و صدای مهیب به حد اعلا می‌رسد."

جدول ۴. محدوده های دارای شاکی نوفه و ارتعاش در خطوط مترو تهران (منبع: گزارشات داخلی شرکت بهره برداری مترو تهران)

ردیف	محدوده ایستگاه	خط	آدرس	شاکی	ردیف	محدوده ایستگاه	خط	آدرس	شاکی
۱	میرداماد-شریعتی	۱	بعد از خ حصارى- ...	دارد	۱۴	انقلاب	۴	سالن بلیط فروش ایستگاه انقلاب خ	ندارد
۲	هفت تیر	۱	ساختمان ... کنار تونل جنوبی	دارد	۱۵	انقلاب	۴	خ انقلاب- خ جمالزاده جنوبی ...	دارد
۳	صادقیه-طرشت	۲	ف دوم صادقیه-بلوار گلاب- ابتدای خ حسینی..	دارد	۱۶	دروازه شمیران	۴	خ انقلاب- بعد از چهارراه نامجو- اول خ کرمی نوری به خ مازندران	دارد
۴	حر-نواب	۲	خ آذربایجان- کوچه شهید فیاضی ...	دارد	۱۷	شیخ الرئیس	۴	میدان غیاثی- خیابان ال آقا...	دارد
۵	حر- امام علی	۲	داروخانه ۲۹ فروردین	دارد	۱۸	اتمسفر	۵	گالری اتمسفر خط پنج	دارد
۶	دروازه شمیران	۲	خ نامجو جنوبی-کوچه ...	دارد	۱۹	ایران خودرو	۵	پیکان شهر مجاور ایستگاه	دارد
۷	ملت- بهارستان	۲	خوابگاه دانشجویان	دارد	۲۰	مرزداران	۶	مرزداران- نیش بلوار سپهر	دارد
۸	فرهنگسرا-تهرانپارس	۲	محله جوادیه	دارد	۲۱	مرزداران	۶	مرزداران- کوچه ابوذر	دارد
۹	منیریه	۳	میدان منیریه-پل امیربهادر	دارد	۲۲	کارگر	۶	موزه هنرهای معاصر / آب وفاضلاب منطقه سه /منزل مسکونی /	دارد
۱۰	منیریه	۳	خ. ولیعصر بالاتراز چهارراه مختاری	دارد	۲۳	جلال آل احمد	۶	دانشکده مدیریت دانشگاه تهران	دارد
۱۱	جهاد	۳	ساختمان ...	دارد	۲۴	بسیج	۷	مجاورت ایستگاه	دارد
۱۲	قدوسی	۳	خیابان قدوسی	دارد	۲۵	مولوی	۷	خیابان مولوی و چهارراه مولوی	دارد
۱۳	شادمان-توحید	۴	...	دارد	۲۶	توحید- باقرخان ...	۷	م جمهوری خ کلهر روبروی شهرداری ...	دارد



شکل ۳. پراکندگی جغرافیایی نقاط شکایت در خطوط مترو تهران- ۱۴۰۲

۱- ۵۰ درصد پرسش شوندگان تنها لرزش را گزارش نموده‌اند و ۴۵ درصد هم لرزش و هم نوفه را گزارش نموده‌اند.

طی نظرسنجی انجام شده از ساکنین در سال ۱۳۹۴ عوامل ایجادکننده نوفه دار ارتعاش دارای اثرات زیر بوده است.

صدای آزاردهنده‌ای است که منبع آن ارتعاش سازه‌ای است. به عبارتی نوفه سازه‌ای مستقیماً به منبع اصلی یعنی ارتعاش قطار مرتبط نیست بلکه عامل ثانویه‌ای است که در اثر مرتعش شدن المان‌های بنا رخ می‌دهد.

با توجه به دو عامل اصلی فوق (ارتعاش سازه‌ای و نوفه سازه‌ای)، تست‌های میدانی بر اساس اندازه‌گیری این دو عامل تدوین گردید. موقعیت انجام تست یکی از مقاطع پر شکایت مترو تهران انتخاب گردید. مقطع تست انتخابی در دو بخش از خط شامل محدوده دارای قوس افقی به شعاع ۲۵۰ متر و محدوده خط مستقیم انتخاب شده است. لازم به توضیح است که در حال حاضر در خطوط مترو تهران در حدود ۱۰ درصد از قوس‌ها در محدوده شعاع زیر ۵۰۰ متر، ۳۰ درصد در محدوده ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و ۶۰ درصد از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متر تعبیه شده است.

۳-۱- اندازه‌گیری ارتعاش

به منظور اندازه‌گیری ارتعاش می‌بایست از سنسورهایی با حساسیت و محدوده فرکانسی مناسب استفاده نمود. بر این اساس جهت اندازه‌گیری ارتعاش از سنسور سرعت سنج سه مولفه‌ای با محدوده فرکانس برداشت ۱ تا ۲۰۰ هرتز استفاده گردید. دیجیتالیزر ثبت و تبدیل برداشت‌ها نیز می‌بایست دارای دقت کافی در اندازه‌گیری‌ها باشد. کلیه تجهیزات قبل از اندازه‌گیری در آزمایشگاه کالیبراسیون معتبر تست و ارزیابی گردید. برداشت‌های ارتعاش در هر نقطه حداقل به مدت ۱ ساعت به صورت مستمر و بدون تغییر موقعیت سنسور انجام گرفته است. در هر موقعیت نصب علاوه بر ارتعاش عبوری قطار ارتعاش پس‌زمینه نیز اندازه‌گیری شد.

بر روی کلیه داده‌های اندازه‌گیری فیلتر میان‌گذر ۱ تا ۱۰۰ هرتز اعمال گردید. همچنین در مواردی خطای Baseline در اندازه‌گیری‌ها مشاهده شد که از داخل اندازه‌گیری‌ها حذف گردید. به منظور مشاهده نتایج در فضای فرکانس از سیگنال‌های برداشت شده تبدیل فوریه گرفته شد. شکل ۴ و ۵ نمونه اندازه‌گیری مقادیر ارتعاش در داخل و خارج یک ساختمان نمونه را نمایش می‌دهد.

۲- ۲۵ درصد از پاسخ دهندگان مشکل را از ابتدای شروع بهره‌برداری و ۷۵ درصد مشکل را پس از چند سال از آغاز بهره‌برداری گزارش نموده‌اند.

۳- تأثیر نوفه و ارتعاش بر ساکنین ۱۰۰ درصد لرزش اجسام، ۸۸ درصد ایجاد آزرده‌گی از زمان استراحت، ۳۸ درصد مشکل کار با کامپیوتر، ۲۵ درصد اختلال در دید گزارش نموده‌اند.

۴- فراوانی شکایت‌ها در قوس‌های تنگ (قوس‌های زیر ۷۰۰ متر) بسیار بیشتر از خطوط مستقیم گزارش شده است.

موارد مطرح شده لزوم انجام ارزیابی میدانی دقیق از مقادیر نوفه و ارتعاش را روشن می‌نماید. اهمیت این مساله از این جهت است که اولاً بر اساس ارزیابی‌ها می‌توان صحت شکایات و نوع آزرده‌گی ساکنین را بررسی نمود و ثانیاً با توجه به تنوع بالای راهکارهای کاهش، این امکان را فراهم می‌آورد که طراح بتواند راهکار مناسبی جهت کاهش مقادیر صدا و ارتعاش فراهم گردد.

۳-۲- تست‌های میدانی

مساله نوفه و ارتعاش در دنیا سابقه طولانی دارد (Cox, 2008, David, 2014, Esmaili et al. 2025).

شاید بتوان گفت که جامع‌ترین منبع در دسترس درخصوص اثرات نوفه و ارتعاش مجموعه مطالعات، اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌های انجام شده توسط موسسه فدرال حمل و نقل آمریکا FTA و دپارتمان حمل و نقل DOT آمریکا می‌باشد (Esmaili et. Al, 2025). نتایج بررسی‌های انجام شده توسط موسسه فوق در قالب یک راهنما انتشار یافته که متدولوژی انجام تست میدانی نوفه و ارتعاش یکی از مواردی است که در آن تشریح شده است. بر اساس راهنمای FTA می‌توان اینگونه بیان نمود که اثرات عبور قطار از مجاورت ساختمان‌ها در دو صورت می‌تواند برای ساکنین ایجاد آزرده‌گی نماید. عامل اول که در راهنمای فوق به عنوان ارتعاش سازه‌ای معرفی گردیده است، لرزش قابل درک توسط انسان می‌باشد که در محل ساختمان سکونت وی آن را ادراک نموده و به علت اینکه به طور مداوم (بر اساس هدوی عبوری قطارها) بروز می‌یابد، در تناوب بالا باعث آزرده‌گی ساکنین در دراز مدت می‌گردد. عامل دوم توسط FTA به نام (Structure borne noise)، یا نوفه سازه‌ای معرفی گردیده است. نوفه سازه‌ای،



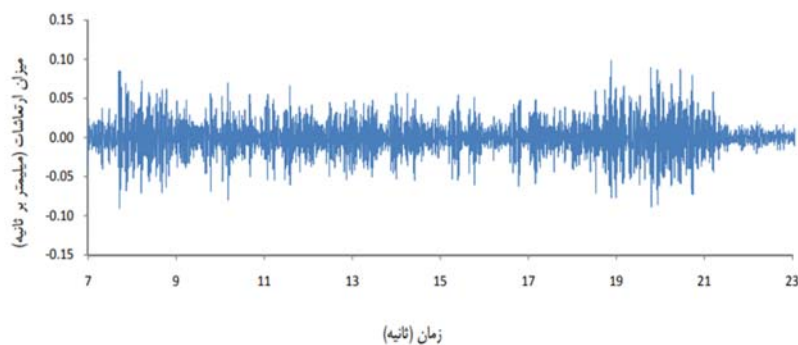
شکل ۵. اندازه گیری ارتعاش خارج ساختمان حین عبور قطار



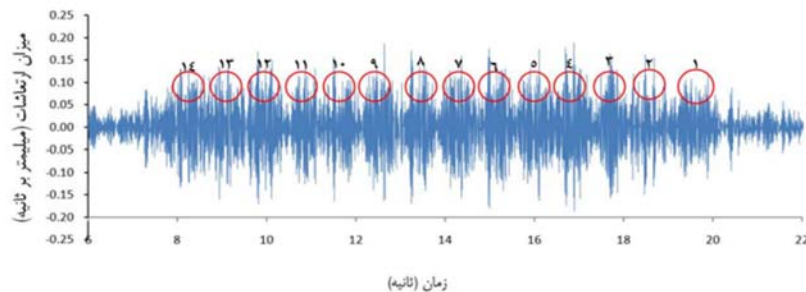
شکل ۴. اندازه گیری ارتعاش داخل ساختمان حین عبور قطار

است. همچنین با توجه به شکل سیگنال عبور بوژی قطار نیز قابل مشاهده است. با توجه به تعداد واگن‌های قطار (۷ واگن) در شکل تعداد ۱۴ بوژی قابل تشخیص است، که زمان عبور کل قطار تقریباً نزدیک به ۱۳ ثانیه طول کشیده شده است.

شکل‌های ۶ و ۷ نمونه تاریخچه زمانی ارتعاش قطار عبوری (بر حسب میلی‌متر بر ساعت) اندازه گیری شده در داخل ساختمان و بیرون ساختمان را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقادیر حداکثر ارتعاش در هر دو مقطع اندازه‌گیری در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه قرار گرفته



شکل ۶. ارتعاش حاصل از قطار، برداشت شده در داخل ساختمان



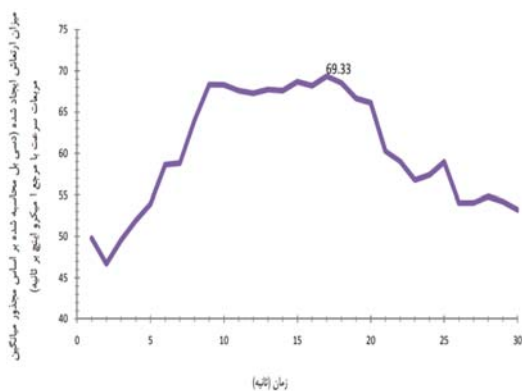
شکل ۷. ارتعاش حاصل از قطار، برداشت شده در خارج ساختمان

سیگنال حوزه زمان ارتعاش، و V_{ref} مقدار سرعت رفرنس است که در راهنمای FTA برابر با ۱ میکرو اینچ بر ثانیه پیشنهاد گردیده است. مقادیر دسیبل حوزه زمان دو سیگنال شکل های ۸ و ۹ محاسبه شده بر مبنای رابطه ۱ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد، ماکزیمم ارتعاشات اندازه گیری شده در حوزه زمان برابر ۶۵ دسیبل و ۶۹ دسیبل به ترتیب در داخل ساختمان و در بیرون آن می باشد.

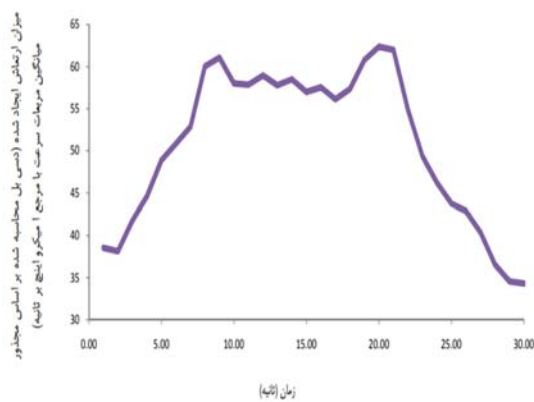
یکی از کمیت های مورد استفاده در راهنمای FTA کمیت دسیبل حوزه زمان است. این کمیت مطابق راهنمای FTA با محاسبه مجذور میانگین مربعات یک ثانیه ای سیگنال اندازه گیری شده در حوزه زمان و سپس انتقال آن به مقیاس لگاریتمی بدست می آید. به عبارتی داریم.

$$L_v = 20 \times \log (V_{rms}/V_{ref}) \quad (1)$$

در رابطه فوق L_v مقدار ارتعاش بر حسب دسیبل، V_{rms} مجذور میانگین مربعات یک ثانیه ای سرعت محاسبه شده از روی

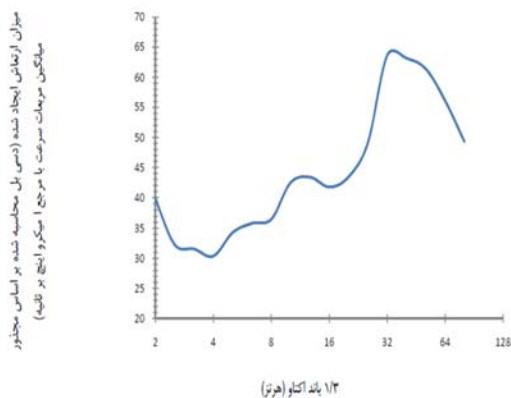


شکل ۹. دسی بل ارتعاش قطار، برداشت شده در خارج ساختمان

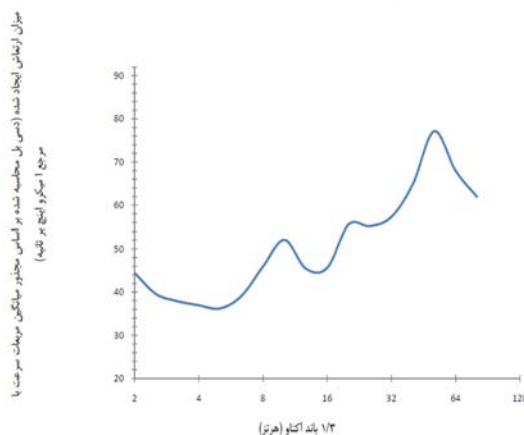


شکل ۸. دسی بل ارتعاش قطار، برداشت شده در ساختمان مسکونی

با توجه به اینکه ارزیابی حوزه فرکانسی اندازه گیری ها نیز حائز اهمیت می باشد، کلیه اندازه گیری ها در حوزه فرکانس نیز تحلیل گردید. شکل ۱۰ و ۱۱ نتایج اندازه گیری ها در حوزه فرکانس برای دو وضعیت داخل و خارج ساختمان را نمایش می دهد.



شکل ۱۱. ارتعاش در پی ساختمان اداری در باند ۱/۳ اکتاو



شکل ۱۰. ارتعاش در طبقه دوم منزل مسکونی در باند ۱/۳ اکتاو

۳-۲- اندازه گیری نوفه

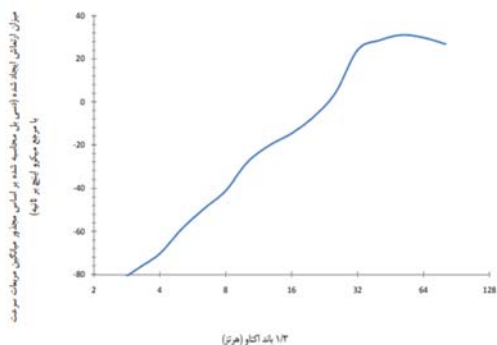
در داخل ساختمان استفاده نمود. روش دیگر جهت تعیین سطح صدای سازه ای محاسبه آن بر مبنای ارتعاش اندازه گیری شده با اعمال فیلتر وزنی نوع A بر روی سیگنال های اندازه گیری است. ب

همانگونه که اشاره گردید یکی از موارد پر رخداد در موضوع آزدگی حاصل از عبور قطارها، نوفه سازه ای است که به صورت یک صدای غرش مانند با هر عبور قطار در داخل ساختمان شنیده می گردد. برای اندازه گیری این اثر می بایست از نصب میکروفون

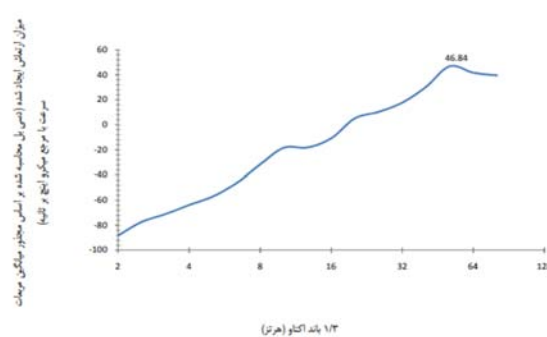
ه عبارتی مطابق توصیه راهنمای FTA رابطه میان نوفه سازه‌ای و ارتعاش به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$L_A = L_v + K_{A-wt} \quad (2)$$

با اعمال رابطه فوق مقادیر نوفه نیز مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ قابل محاسبه است.



شکل ۱۳. میزان دسی بل نوفه ایجاد شده در پی ساختمان اداری در فضای فرکانسی (باندهای ۱/۳ اکتاو)



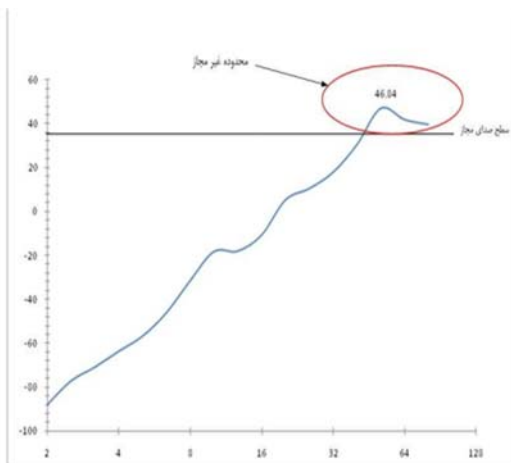
شکل ۱۲. میزان دسی بل نوفه ایجاد شده در طبقه دوم منزل مسکونی در فضای فرکانسی (باندهای ۱/۳ اکتاو)

۳-۳- ارزیابی نتایج اندازه گیری نوفه و ارتعاش

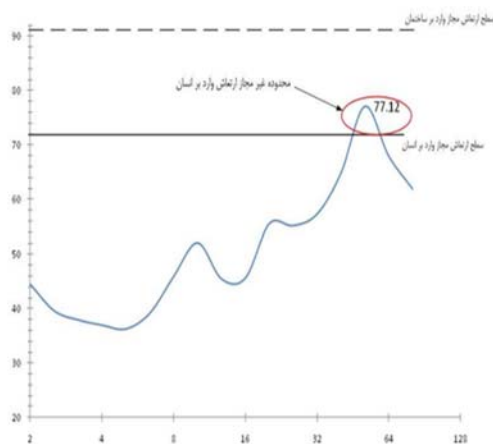
اینکه دو ساختمان مورد بررسی دارای کاربری مسکونی هستند، لذا مقدار مجاز آن بایستی بر اساس کاربری مسکونی ارزیابی شود. شکل ۱۴ آئین نامه‌های موجود در دنیا و مقادیر مجاز هر یک از آنها را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر مجاز ارتعاش در روز و شب برای ساختمان مسکونی متفاوت است. همچنین آئین نامه کشورهای مختلف نیز اندکی با یکدیگر متفاوت هستند. با این حال به عنوان جمع بندی می‌توان گفت که مقادیر ارتعاش مجاز در روز و شب برابر با ۷۲ دسیبل مقدار مناسبی است. مقادیر مجاز ارتعاش در فضای فرکانس نیز موضوع حائز اهمیتی است.

شکل ۱۵ مقادیر مجاز ارتعاش در فضای فرکانس را نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل مذکور قابل استنباط است، مقدار مجاز در فرکانس‌های مختلف متفاوت است. در فرکانس زیر ۸ هرتز مقدار مجاز مقادیری کمتر سخت گیرانه دارد. در فرکانس های بالاتر مقدار مجاز سخت گیرانه تر است.

آئین نامه‌های متعددی در دنیا برای ارزیابی مقادیر مجاز نوفه و ارتعاش وجود دارند. بررسی این آئین نامه‌ها نشان می‌دهد که مقدار مجاز ارتعاش در حله اول به دریافت کننده آن وابسته است (DIN 45673, 2008). به عبارتی بر حسب اینکه دریافت کننده نوفه و یا ارتعاش انسان، ساختمان، تجهیزات حساس، یا بنای فرهنگی خاصی باشد مقدار مجاز نوفه و ارتعاش متفاوت خواهد بود. عامل دوم اثر گذار بر مقدار مجاز نوفه و ارتعاش وضعیت دریافت کننده در زمان بروز ارتعاش است (Hood et al, 1996). به عنوان نمونه در خصوص مقدار مجاز ارتعاش وارد شده بر انسان، بر حسب اینکه انسان در حال کار کردن باشد (فضای اداری)، در حال خواب باشد (فضای مسکونی)، در کنسرت یا تئاتر شرکت کرده باشد (آمفی تئاتر یا سالن کنسرت) و یا در حال عبادت باشد (مسجد یا کلیسا)، مقدار مجاز ارتعاش متفاوت خواهد بود. بر این اساس در مطالعه انجام شده در مترو تهران نوع کاربری ساختمان در مقدار مجاز آن تاثیرگذار خواهد بود. با توجه به

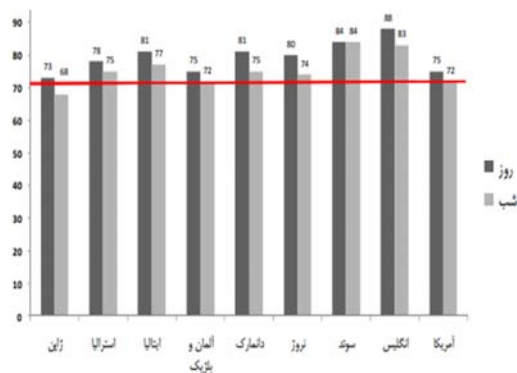


شکل ۱۶. صدا غیر مجاز در اندازه گیری منزل مسکونی و مقایسه با مقدار مجاز

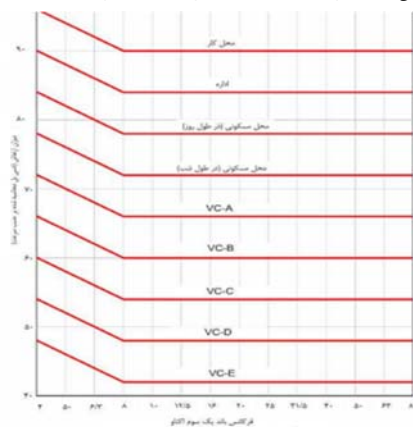


شکل ۱۷. ارتعاش غیر مجاز در منزل مسکونی و مقایسه با مقدار مجاز

شکل ۱۸ مجموعه ۲۶ برداشت میدانی وسیع انجام گرفته در کشورهای اروپایی آمریکایی و آسیایی حاصل از ارتعاشات خطوط مترو را نمایش می‌دهد. این تست‌ها روی خطوط حمل و نقل ریلی سبک (LRT) با بار محوری بین ۸ تا ۱۰ تن و برای خطوط متروی سنگین با بار ۱۶ تا ۱۸ تن انجام شده است. جرم ریلها در این خطوط بین ۴۰ تا ۶۰ کیلوگرم بر متر می‌باشد. تمام این خطوط خطوط بدون بالاست قرار گرفته روی بستر صلب بوده و سیستم اتصالات این خطوط شامل پابند ساده، خطوط دارای بیس پلیت، تراورس‌های دو بلوک با لایه‌های ارتجاعی چکمه ای و تراورس‌های غرق در بتن هستند. همانگونه که از شکل قابل ملاحظه است. فرکانس‌های معرفی شده برای خطوط متروی بررسی شده قابل تشخیص است.



شکل ۱۴. آیین نامه های ارتعاش مجاز ریلی وارد به انسان



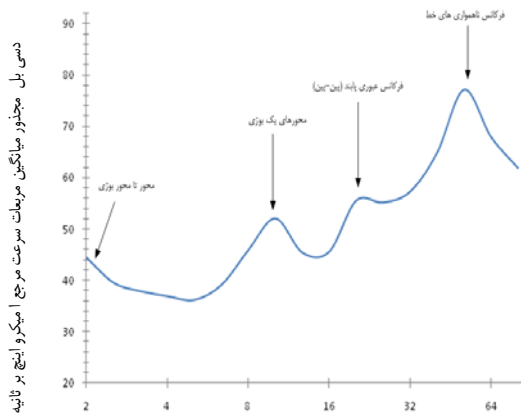
شکل ۱۵. مقادیر مجاز ارتعاش در روش تحلیل تفصیلی

مقایسه میان مقادیر نوفه و ارتعاش برداشت شده با مقادیر مجاز آن در فضای فرکانس در شکل ۱۶ و ۱۷ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر ارتعاش و نوفه در فضای فرکانس برای مقطع تست شده از حد مجاز در فرکانس ۶۴ هرتز بیشتر شده است.

به عبارتی فرکانسی که باعث آزرده‌گی شده است فرکانس ۶۴ هرتز است که سطح بالایی از آزرده‌گی را ایجاد کرده است. این فرکانس در محدوده فرکانس تحریک ناهمواری‌های خط و خرابی‌های ریل قابل محاسبه از رابطه ۳ قرار دارد. بر اساس این رابطه با داشتن طول موج‌های غالب در سطح ریل و سرعت چرخ عبوری از روی آنها می‌توان فرکانس بحرانی ایجاد شده در اثر ناهمواری‌های سطح ریل را محاسبه نمود.

$$f = \frac{V}{3.6\Delta X} \quad (3)$$

در رابطه فوق V ، سرعت قطار بر حسب کیلومتر بر ساعت، و ΔX طول موج ناهمواری‌های سطح ریل بر حسب متر می‌باشد.



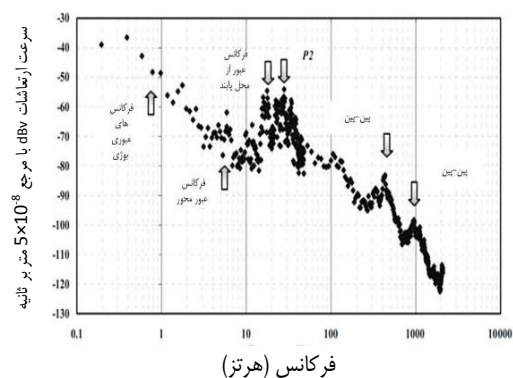
۱/۳ پاند اکتاو (هرتز)

شکل ۱۹. ارتعاش منزل مسکونی و تطابق با جدول ۵

۴- بررسی رابطه خرابی‌های ریل با ارتعاشات

همانگونه که در بخش قبل ملاحظه گردید خرابی سطح ریل عامل بروز ارتعاش غیر مجاز (فرکانس محدوده ۶۴ هرتز) می‌باشد. برای بررسی رابطه میان خرابی‌های روسازی با مقادیر ارتعاشات، داده‌های خرابی‌ها به عنوان ورودی و داده‌های پاسخ مربوطه (داده‌های ارتعاش روی بدنه واگن) به عنوان خروجی تعریف گردیدند. هدف، بررسی رابطه این دو سری داده شامل ارتعاش ناوگان و خرابی ریل می‌باشد. برای اعمال همبستگی بین داده‌های ارتعاش و خرابی سطح ریل لازم است برخی تنظیمات بر روی داده‌ها انجام شود. کلیه خرابی‌های خط طی بازرسی مکرر از خطوط مترو تهران مورد شناسایی قرار گرفته است. شکل ۲۰ فراوانی خرابی در مترو تهران- خط ۳ طی ۲ سال نظارت را نمایش می‌دهد. مطابق شکل، دو گروه از خرابی‌ها، مواردی هستند که یا مربوط به زمان ساخت بوده است (اکتون بر طرف شده است)، و یا اینکه بر مقادیر ارتعاشات قائم تاثیر گذار نیستند (عیوب ظاهری هستند که باعث تشدید دینامیک چرخ و ریل نمی‌شود). همانگونه که ملاحظه می‌گردد، خرابی‌های محل جوش، کاریوگیشن و خرابی درز ریل از جمله مواردی هستند که دارای شیوع بالاتری نسبت به سایر خرابی‌ها است، و احتمالاً بیشترین تاثیر را بر سطح ارتعاشات ایجاد شده دارند.

شکل شماره ۲۱ شتاب سنج‌های نصب شده روی سر محور و بدنه بوژی را جهت ثبت ضربات دینامیکی وارد بر قطار نمایش می‌دهد. قطار انتخاب شده جهت ایزار بندی یکی از قطارهای



شکل ۱۸. فرکانس‌های تحریک خط در برداشت ۲۶ خط مترو (Cox et al, 2008)

در ادامه فرکانس‌های فوق برای خط ۱ مترو تهران و برای ناوگان موجود با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت و برای مقادیر مختلف سختی دینامیکی در جدول شماره ۵ محاسبه شده است. در محاسبه فرکانس چرخ بارگذاری شده وزن غیر معلق چرخ برابر ۲۵۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده (Park et al, 2025) و همچنین در محاسبه وزن روسازی از مشخصات روسازی مترو تهران استفاده شده است.

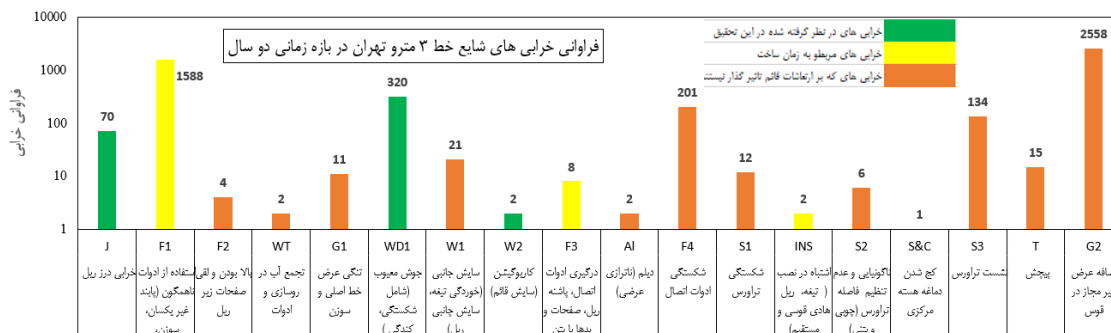
نتایج جدول ۵ در نمودار ارتعاشات رسیده به منزل مسکونی نیز قابل شناسایی است. شکل ۱۹ فرکانس‌های برداشت شده در منزل مسکونی و تطابق آنها با محاسبات را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد فرکانس منجر به ایجاد آزردهگی (فرکانسی که در آن ارتعاش از حد مجاز بیشتر بوده است)، در محدوده ۶۴ هرتز و به علت وجود ناهمواری خط می‌باشد. این مساله اهمیت توجه به ناهمواری‌های خط را روشن می‌سازد.

جدول ۵. فرکانس عملکردی سیستم ناوگان خطوط متروی تهران

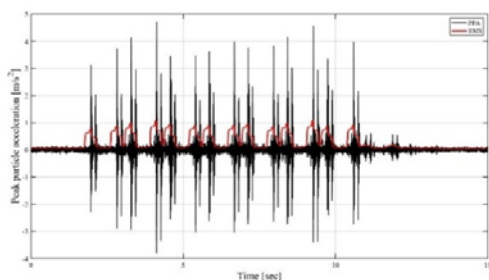
مقدار (هرتز)	نوع فرکانس	
۱/۳۲	محور تا محور بوژی ها	
۷/۵۷	محور های یک بوژی	
۶۰	فرکانس ناهمواری خط	
۲۷	فرکانس pin-pin (عبوری پابند)	
۳۷	$K_{\gamma} = 100 KN / mm$	فرکانس خط بارگذاری شده بر حسب سختی مختلف روسازی
۳۶	$K_{\psi} = 75 KN / mm$	
۳۴	$K_{\varphi} = 50 KN / mm$	
۳۲	$K_{\varphi} = 40 KN / mm$	
۳۱	$K_{\delta} = 30 KN / mm$	
۲۸	$K_{\rho} = 20 KN / mm$	
۲۲	$K_{\nu} = 10 KN / mm$	
۱۷	$K_{\lambda} = 5 KN / mm$	

برداشت گردید. با استفاده از دو شتاب مذکور می‌توان نیروی دینامیکی وارد بر خط را نیز محاسبه نمود. جهت محاسبه نیروی دینامیکی مذکور می‌توان از فیلتر کالمن استفاده نمود (Quagliata et al., 2018, Sadeghi et al. 2017).

تیپ مترو تهران (نوع AC)، با هماهنگی شرکت بهره‌برداری مترو تهران است. به منظور برداشت اطلاعات با شرایط واقعی، قطار در زمان بهره‌برداری و با حضور مسافران با سرعت سیر نرمال سیر داده شد، و شتاب بدنه و سر محور به صورت همزمان



شکل ۲۰. نمونه مقادیر فراوانی خرابی‌های روسازی برداشت شده طی ۲ سال در خط ۳ مترو تهران



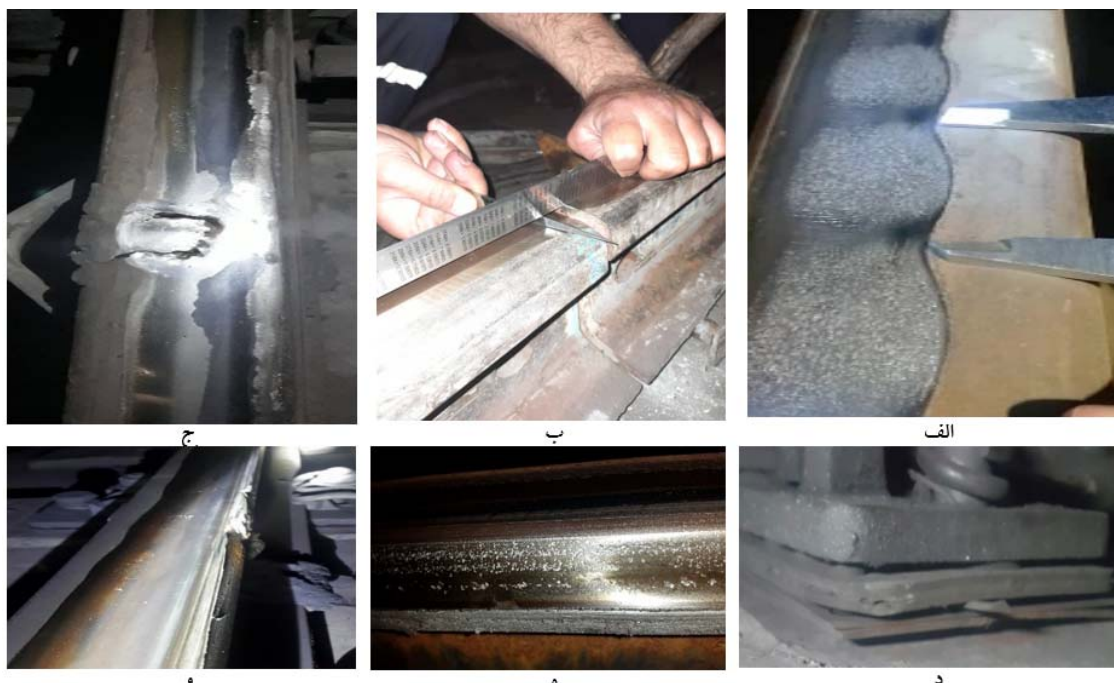
شکل ۲۲. نمودار سیگنال شتاب برداشت شده سر محور

علاوه بر برداشت شتاب بر روی سر محور و واگن، خرابی‌های روسازی طی دو سال بهره‌برداری از دستگاه نظارت و پیمانکار نگهداری شرکت بهره‌برداری مترو تهران دریافت و آنالیز گردید. نوع خرابی‌ها و فراوانی آنها در شکل شماره ۲۰ ارائه شد. مقایسه ماهیت خرابی‌ها در خط مستقیم و در محل قوس در شکل‌های ۲۳-الف تا ۲۳-ج ارائه شده است. شکل‌های ۲۳-الف تا ۲۳-ج ماهیت خرابی‌ها در محل قوس‌ها را نمایش می‌دهد. همچنین شکل‌های ۲۳-د تا ۲۳-و ماهیت خرابی‌های غالب خط مستقیم را نمایش می‌دهد. همانگونه که از این شکل‌ها قابل استنباط است، هرچند خرابی روسازی هم در محل خط مستقیم و هم در محل قوس وجود دارد، ولیکن ماهیت خرابی‌های خط قوس و خط مستقیم با یکدیگر متفاوت است. خرابی‌های ایجاد شده در محل قوس از نوع خرابی‌هایی هستند که تاثیر بیشتری بر نیروهای دینامیکی میان چرخ و ریل دارند.

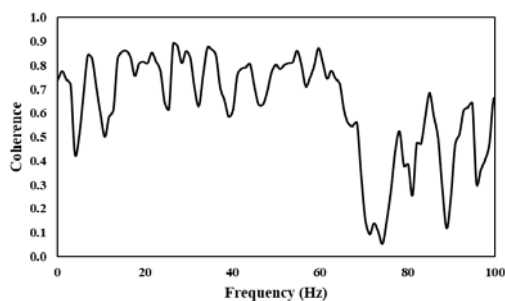
شکل ۲۲ شتاب روی سر محور در قوس شعاع ۲۸۷ متر را نمایش می‌دهد. مقادیر قله نشان دهنده نقاط تشدید نیروی دینامیکی است. ملاحظه می‌گردد که، توالی منظم ضربات در چرخ بروز نموده است. با محاسبه فرکانس این توالی می‌توان ملاحظه نمود که مقدار آن با فرکانس محاسباتی پابند در جدول ۵ برابر است. به عبارتی شتاب روی چرخ در عبور از روی پابند به محدوده بدون پابند (بین دو پابند) دچار تحریک منظم شده است. همچنین سایر فرکانس‌های محاسباتی در جدول ۵ نیز در سیگنال شکل ۲۲ قابل شناسایی است. نهایتاً می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس‌های تحریک تماس چرخ-ریل دارای مطابقت با فرکانس‌های برداشتی روی زمین بوده، و لذا اثرات تشدید لایه‌های خاک، پی ساختمان و یا سایر مسائل مربوط به انتشار موج در خاک تاثیر چندانی در طیف ارتعاش ساختمان نداشته و تشدید به علت اندرکنش چرخ و ریل رخ داده است.



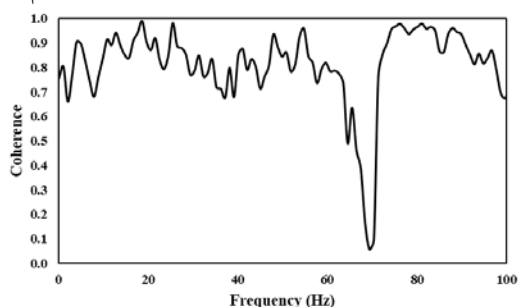
شکل ۲۱. شتاب سطح‌های روی جعبه باتاقان و فریم



شکل ۲۳. ناهمواری‌های شناسایی شده در قوس الف) کاربوگیشن ب) افتادگی درز ریل ج) کندگی، و خط مستقیم د) آویزان شدن پابند ه) سایش RCF سطح ریل و و) سایش کناری ریل



شکل ۲۴. همبستگی خرابی روسازی و ارتعاش در خط مستقیم



شکل ۲۵. همبستگی خرابی روسازی و ارتعاش در قوس

شکل شماره ۲۴ و ۲۵ نمودار همبستگی میان شتاب روی چرخ و ارتعاش خط را در شرایط حرکت در خط مستقیم و حرکت در قوس نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل قابل استنباط است، مقادیر همبستگی، نشان دهنده معناداری ارتباط ارتعاشات و خرابی‌ها (شتاب روی محور نماینده خرابی‌ها است)، در هر دو بخش خط مستقیم و قوس می‌باشد. با این وجود مقدار همبستگی خرابی با ارتعاشات خط در محل قوس دارای مقادیر کمی بیشتری است (مقادیر به عدد همبستگی کامل یعنی عدد ۱ نزدیک‌تر است (Siddal, 1974, Van Kempen et al, 2025, Wilson, 1963, Wilson et al. 1983). به عبارتی اثرات خرابی‌ها بر روی ارتعاشات ایجاد شده، در قوس دارای سهم بیشتری می‌باشد. این موضوع اهمیت توجه بیشتر به خرابی‌ها در محل قوس را نمایان می‌سازد. با توجه به خرابی‌های غالب شناسایی شده در شکل ۲۳، از میان خرابی‌های مختلف، خرابی‌های دارای اثرات تحریک قائم می‌بایست در فرآیند تعمیر و نگهداری بیشتر مورد توجه واقع گردند.

با توجه به تاثیر خرابی‌های قوس در ایجاد ارتعاشات، در ادامه این تحقیق یک بررسی میان مقادیر همبستگی میان ارتعاشات و خرابی قوس‌ها در شعاع‌های مختلف انجام گرفت. بدین منظور بر اساس برداشت‌ها در خطوط مترو تهران از شعاع ۲۸۵ متر تا شعاع ۳۰۰۰ متر، مقادیر همبستگی میان ارتعاشات خط و

شده روی سرمحور محاسبه گردید. ارزیابی انجام شده بر روی مقادیر همبستگی نشان داد که در محدوده قوس‌ها، مقدار تاثیر خرابی بر ارتعاشات خط بیشتر از خطوط مستقیم است. این مساله عمدتاً به این علت است که خرابی ای قائم، در محل قوس‌ها بیشتر بروز می‌کند. لذا لازم است در مراحل تعمیر و نگهداری خرابی‌های ایجاد شده در محل قوس‌ها بیشتر مورد توجه واقع گردد. تحلیل مقادیر همبستگی در قوس‌های با شعاع مختلف و مقایسه آن با خط مستقیم نیز نشان داد که مقادیر همبستگی در قوس‌های با شعاع بیشتر از ۷۰۰ متر عملاً تفاوتی با خط مستقیم ندارد. بر اساس این یافته می‌توان به مهندسين طراح توصیه نمود که در زمان طراحی تلاش گردد تا شعاع قوس بیشتر از ۷۰۰ متر در طرح لحاظ گردد، و حتی الامکان از تعبیه قوس‌های تنگ (شعاع کم تر از ۷۰۰ متر)، اجتناب گردد.

۶-مراجع

-شرکت بهره‌برداری مترو تهران و حومه (۱۳۸۸). مطالعات و ارزیابی نوفه و ارتعاش خط ۱ مترو تهران.
-معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۹۷). ارزیابی ارتعاشات واصل به ابنیه تاریخی در خط ۱ مترو اصفهان.
-معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان (۱۳۹۸). اندازه‌گیری ارتعاشات واصل به مسجد کبود.
-آزمایشگاه مهندسی راه‌آهن دانشگاه اصفهان (۱۴۰۲). آزمایشات کنترل کیفی ادوات روسازی خط ۲ مترو اصفهان. شرکت مهندسين مشاور ره‌ساز طرح.

-Cox, S., A. Wang, and A. Adedipe. (2008). Survey of metro excitation frequencies and coincidence of different modes. in *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems: Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, Munich, Germany, 4-8 September 2007*. Springer.

-David, T., (2014). Inverse force estimation for a railway vehicle system, in Institute for Mechanics Faculty of Mechanical Engineering and Economic Sciences. *Graz University of Technology*.

-Esmaeili, M.H., et al., (2025). Estimation of wheel-rail dynamic load in vicinity of track local defects using on-board train acceleration measurements. *Heavy Vehicle Systems*.

خرابی‌های خط محاسبه گردید. ارزیابی انجام شده نشان داد که مقدار همبستگی میان خرابی‌ها و ارتعاشات خط در مقادیر شعاع قوس بالاتر از ۷۰۰ متر تفاوت چندانی با مقادیر همبستگی در خط مستقیم ندارد. به عبارتی رفتار ارتعاشی خط در شعاع‌های بالاتر از ۷۰۰ متر با رفتار ارتعاشی خط مستقیم یکسان است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که شعاع قوس کم تر از ۷۰۰ متر تاثیر بیشتری از لحاظ ارتعاشی بر خط دارد. با توجه به این یافته می‌توان به مهندسين طراح توصیه نمود که تا حد امکان از تعبیه قوس‌های با شعاع کم تر از ۷۰۰ متر در طراحی تا حد امکان اجتناب نمایند.

۵-نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر نوفه و ارتعاش به عنوان یکی از اثرات محیطی سیستم‌های حمل و نقل ریلی به خصوص در مناطق شهری مورد توجه محققین قرار گرفته است. همچنین بررسی شکایات ساکنین مجاور خطوط ریلی درون شهری نشان می‌دهد، که چالش فوق در فضای مهندسی نیز هنوز مرتفع نشده و نیاز به تعمق و ادراک بیشتری دارد. هرچند یکی از روش‌های رفع چالش فوق استفاده از روش‌های کاهش ارتعاش است، و لیکن شرایط تعمیر و نگهداری خطوط و ناوگان نیز به عنوان یکی از مسائل تاثیر گذار بر مقوله ارتعاش به شمار می‌رود که نقش این عامل در ارتعاش ایجاد شده در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مقاله میزان تاثیر پارامترهای تعمیر و نگهداری خطوط بر روی ارتعاشات با انجام اندازه‌گیری‌های میدانی در خطوط مترو تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور مقادیر ارتعاش و نوفه در داخل و خارج یکی از ساختمان‌های شاکی از ارتعاش اندازه‌گیری، و با مقادیر مجاز مقایسه شد. مقایسه انجام شده نشان داد که نوفه و ارتعاش اندازه‌گیری شده از مقادیر مجاز اعلام شده در استانداردها بیشتر است. محدوده فرکانس حاوی ارتعاشات غیر مجاز فرکانس مرکزی ۶۴ هرتز شناسایی گردید. همچنین مقادیر ارتعاشات ناوگان مترو در حین عبور از روی خرابی‌های مختلف اندازه‌گیری و تحلیل شد. بر اساس نتایج این تحقیق شدت خرابی‌های روسازی تاثیرات قابل توجه بر مقادیر ارتعاشات ناوگان و خط دارد. به طور عمده خرابی‌های درز ریل، کندگی سطح ریل و کاربوگیشن به عنوان خرابی‌های غالب تشدید کننده اثرات ارتعاش شناسایی گردید. همچنین مقادیر همبستگی میان خرابی‌ها در روسازی با ارتعاشات اندازه‌گیری

- Sadeghi, J. and M.H. Esmaeili, (2017). Safe distance of cultural and historical buildings from subway lines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 96: 89-103.
- Siddall, W.R., (1974). No nook secure: transportation and environmental quality. *Comparative Studies in Society and History*, 16(1): 2-23.
- Van Kempen, E., et al., (2025). Annoyance and sleep disturbance due to vibrations from trains. Results from the Follow-Up Study 'Wonen langs het spoor' ('Living along the railway line').
- Wilson, A.H., Noise. (1963). Final Report. Presented to Parliament by the Lord President of the Council and Minister for Science by Command of Her Majesty, 128., London, *Her Majesty's Stationery Office*.
- Wilson, G., H. Saurenman, and J. Nelson, (1983). Control of ground-borne noise and vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 87(2): 339-350.
- German Institute for Standardization, (2008). B., DIN 45673-4 Mechanical vibration – Resilient elements used in railway tracks – Part 4: Analytical evaluation of insertion loss of mounted track systems.
- Hood, R., et al., (1996). The calculation and assessment of ground-borne noise and perceptible vibration from trains in tunnels. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1): 215-225.
- Park, S.H., et al., (2025). Railway and road traffic noise annoyance of residents in high-rise apartments. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 146: 104856.
- Quagliata, A., et al., (2018). Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual [2018]. United States. *Federal Transit Administration. Office of Planning*.

Field Study of Noise and Vibration Effect on Buildings Adjacent to the Metro Effect of Maintenance Parameters

*Mohammad Hassan Esmaeili, Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering
and Transportation, Department of Railway Engineering and Transportation Planning,
University of Isfahan, Isfahan, Iran.*

*Seyed Javad Mir Mohammad Sadeghi, Professor, School of Railway Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Masoud Nasr Azadani, Associate Professor, School of Railway Engineering, Iran University
of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Saeed Motamedi, Ph.D., Student, School of Railway Engineering, Iran University of Science
and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: m.h.esmaeili@eng.ui.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

The effects of noise and vibration have become one of the problems of citizens living in metropolitan cities in recent years. Although noise and vibration in cities originate from many sources, but where the source is permanent, the adverse effects is much greater than the transient sources. The urban rail transportation system is a permanent source of noise and vibration in cities, in which appropriate measures must be taken to eliminate its effects. Despite the importance of this issue, complaints from people on the currently operating metro lines shows that not enough studies have been conducted in this area. The present study aims to investigate and evaluate the effects of noise and vibration from metro lines based on a set of measurements. Accordingly, the values of vibration and noise were recorded and evaluated as examples in two problematic sections in the Tehran metro. The study shows that there is a great correlation between rail surface defects and track vibrations. The correlation values are much higher in the curved sections compared with straight parts of the track. Considering various curve radii, the correlation values in the curves with more than 700 meters radii is similar to the straight track sections. Therefore, it can be concluded that applying a curve radius of less than 700 m in metro lines can have a significant impact on vibrations. Accordingly, it is recommended to avoid a curve radius of less than 700 m in the early design stages of the railway project.

Keywords: Noise, Vibration, Tight Curve, Field Tests, Track Defects