

کنترل ارتعاشات با استفاده از پدهای جاذب انرژی - مطالعه موردی خط ۷ متروی تهران

مقاله پژوهشی

محمد فیاض^{۱*}؛ مهدی دهقان نژاد ثانی آبادی^۲

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، mahfayyaz@ihu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایون کی، Mahdi.deh1378@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱

شماره صفحات: ۱ تا ۱۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.10829.1425

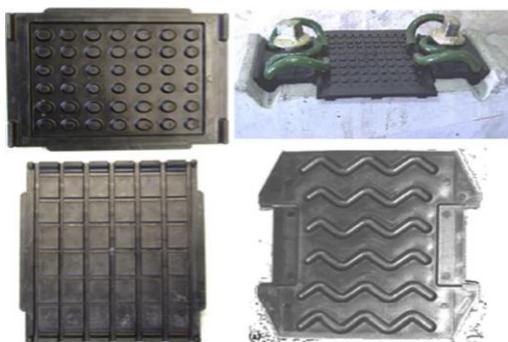
واژگان کلیدی	چکیده
ارتعاشات حمل‌ونقل شهری پد الاستیک پدهای جاذب انرژی خط هفت مترو تهران	یکی از آثار زیست‌محیطی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری ایجاد ارتعاشات ناخواسته است. این ارتعاشات به علت تواتر بالای عبور قطارها و قرارگیری کاربری‌های مسکونی در مجاورت خطوط ریلی درون‌شهری از عوامل ایجاد مزاحمت می‌باشند. راهکارهای کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطارهای شهری و به‌طور کلی سیستم حمل‌ونقل ریلی باید با عنایت به ماهیت فرکانسی ارتعاش موردنظر انتخاب گردد. روش‌های متعددی جهت ایزولاسیون و کنترل ارتعاشات وجود دارد. استفاده از پدهای ارتجاعی در طول خط ریل روشی نوین جهت کاهش ارتعاشات است. در تحقیق پیشرو ارتعاش انتقال‌یافته به سطح زمین در مجاورت خط هفت متروی تهران اندازه‌گیری، محاسبه و با مقادیر مجاز، مقایسه گردیده است، همچنین با بررسی پدهای جاذب انرژی، به‌عنوان یک روش مؤثر در کاهش مخاطرات ناشی از ارتعاشات، نقش آن در کاهش ارتعاش سیستم روسازی خط ۷ متروی تهران مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی تأثیر پد معرفی شده در کاهش ارتعاشات به میزان قابل قبول بوده است.

۱- مقدمه
سیستم حمل‌ونقل باشد (Vogiatzis & Kouroussis, 2017). بدیهی است که خطوط ریلی در حین بهره‌برداری با مشکلاتی مواجه است. با عبور از قطار، بارهای ضربه‌ای دینامیکی توسط تعامل قطار و ریل ایجاد می‌شود. این باعث ایجاد آستانه تنش بالا، سطح بیش‌ازحد نویز و ارتعاش، نشست‌های دیفرانسیل، تغییر شکل بالاست و تخریب می‌شود (Costa, et al., 2012) و (Nimbalkar, et al., 2012) و (Kaewunruen, 2014). با افزایش سرعت حرکت قطار و افزایش بارگذاری وارد بر ریل، میزان

امروزه یکی از روش‌های کارآمد حمل‌ونقل در سراسر دنیا، خطوط حمل‌ونقل ریلی هست. ظرفیت جابجایی، کارایی و عملکرد بالا درعین حال، پایین بودن آلودگی‌های محیط‌زیستی از جمله مزایای این سیستم حمل‌ونقل است. با این وجود ارتعاشات ناشی از زمین و قرار گرفتن در معرض صدا برای ساکنان بیشتر از قبل است، بنابراین درک آن‌ها توسط مردم و همه موجودات زنده نیز وجود دارد. ارتعاشات می‌تواند یک نگرانی جدی برای همسایگان نزدیک این

* تهران؛ اتوبان شهید بابایی؛ بعد از پل لشگرک؛ روبروی حکیمیه؛ دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ دانشکده مهندسی عمران؛ طبقه اول؛ کدپستی:

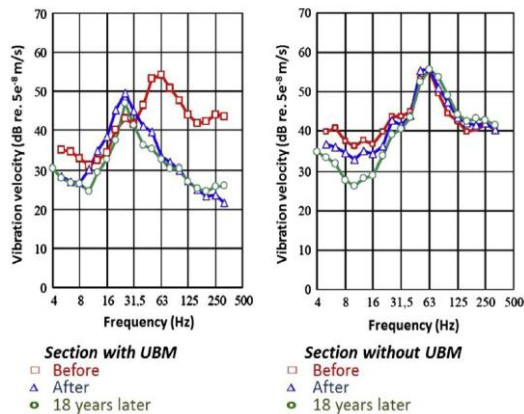
(Kaewunruen, et al., 2017). در این تحقیق، ضمن معرفی روش نوین کاهش ارتعاشات، معیارهای انتخاب پد بهینه و نحوه‌ی به‌کارگیری المان‌های الاستیک در کاهش این ارتعاشات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها با مطالعه پروژه خط ۷ متروی تهران، تأثیر ریل پدها در کنترل ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه استفاده از المان‌های الاستیک جهت اصلاح سختی ریل با ظرفیت‌های میرایی بالا در شکل‌های گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. سبک بودن، مقاومت بالا در برابر خوردگی و نصب آسان نتیجه ماهیت پلیمری این المان‌ها است. باین‌حال یکی از معضلات استفاده از آن، تخریب در شرایط بد محیطی مانند افزایش بیش‌ازحد دما، اکسیداسیون و هیدرولیز است. همین مساله باعث شده است عمر مفید بیست سال برای المان‌های الاستیک در نظر گرفته شود (Loy, 2009). شکل‌های متفاوتی از المان‌های الاستیک وجود دارد مانند: پد زیر ریل، فرش بالاست، پد زیر تراورس، پد زیر صفحه فلزی (زینچه)، پدهای الاستیک زیر تراورس دی بلوک، پرکننده‌های ریل قاشقی، الاستومر در سیستم‌های جرم و فنر، الاستومرهای ممتد ریل که نه‌تنها به‌عنوان المان کاهنده ارتعاش بلکه گاهی مانند ژئوگریدها به‌منظور تقویت سیستم ریل به‌کاربرده می‌شوند (Kaewunruen & Remennikov, 2006). در شکل ۱، برخی از ریل پدهای موجود آورده شده است. ریل پدها المان‌هایی از جنس پلاستیک فشرده، پلی‌اتیلن فشرده، ترموپلاستیک پلی‌استر الاستومر و یا اتیلن وینیل اسیتیت می‌باشند (Sanchez, et al., 2022).



شکل ۱- انواع ریل پد (Pita, 2006)

تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۸ در دانشگاه ولونگونگ انجام شد، نشان داد استفاده از ریل پدهای HDPE منجر به اتلاف انرژی ۵۰ درصد تحت اثر بارگذاری ضربه‌ای شده

آسیب‌های وارده نیز افزایش پیدا می‌کند که این مساله مستقیماً با سختی ریل در ارتباط است. از همین رو انتخاب بستری با الاستیسیته مناسب نقش به‌سزایی در کنترل ارتعاشات ناشی از حرکت قطار دارد (Prud'homme, 1978). اساساً این روش‌ها در سه دسته‌ی کلی (۱) کاهش ارتعاش در منبع، (۲) کاهش ارتعاش در مسیر انتشار و (۳) کاهش ارتعاش در گیرنده ارتعاش تقسیم‌بندی می‌شود (Witt, 2008). طبق تحقیقات صورت گرفته فرکانس بالای بارگیری و مقدار بیش از حد بار محوری افزایش یافته است زیرا قطارها سریع‌تر و سنگین‌تر می‌شوند. در این راستا، بهبود در طراحی مسیر، مانند استفاده از تشک زیر بالاست، برای بهبود عملکرد حیاتی است (wang, et al., 2023). علاوه بر کاهش نویز، لرزش و تخریب بالاست، برای بهبود رفتار دینامیکی مسیرها طراحی شده‌اند و در نتیجه عمر مفید آن‌ها را افزایش داده و ایمنی را افزایش می‌دهند (Hunt, 2000). تحقیقاتی نیز راجب بهترین روش‌ها و شیوه‌های در حیطه کاهش ارتعاشات و نویز ناشی از حمل نقل ریلی انجام گردیده است (Ouakka, et al., 2022). همچنین ایده‌ی روش WIB، برگرفته از سنگ‌بستر طبیعی به‌عنوان مانعی در دفع و پخش ارتعاشات است. در این روش با ایجاد سنگ بستری مصنوعی همچون تزریق سیمان داخل خاک در زیر ساختمان‌ها نیز می‌توان از اثر این ارتعاشات کاست. استفاده از المان‌های الاستیک جهت کاهش تنش‌های وارد بر ریل، یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده جهت کاهش تنش‌های وارد بر ریل است. در یک تقسیم‌بندی کلی المان‌های الاستیک در سه دسته‌ی (۱) ریل پد، (۲) تراورس پد (۳) فرش زیر بالاست تقسیم‌بندی می‌شوند (Zaker, et al., 2022). تغییرات سختی قائم خط در طول مسیرهای ریلی می‌تواند منجر به افزایش بارهای دینامیکی، ایجاد تغییر شکل‌های نامنتظران، آسیب دیدن اجزاء خط و در نتیجه افزایش هزینه‌های نگهداری گردد (Zakeri, et al., 2016). در زمینه کاربرد ریل پدها و تأثیر آن بر کنترل ارتعاشات تحقیقاتی بسایری صورت گرفته است (Xiang Wu, et al., 2011)؛ (Nagai Ito, 2008). تحقیقاتی نیز در زمینه تأثیر سختی پدهای زیر تراورس بر کاهش ارتعاشات ناشی از حمل‌ونقل ریلی با استفاده از مواد کامپوزیتی که به نتایج مطلوبی منجر شده است



الف) منطقه ۱ ب) منطقه ۲

شکل ۳- مقایسه ارتعاش لایه‌ی بالاست قبل و بعد از استفاده از فرش زیربالات

- تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که کاهش سختی ریل پدها (80 KN/mm) سبب افزایش تغییر شکل‌های ریل می‌شود، که این مساله خود منجر به افزایش خستگی، ارتعاشات و صداهای مزاحم می‌شود.
- در ارتباط با پدهای زیر تراورس، توصیه بر این است که در صورت نیاز به کاهش ارتعاشات از نوع با سختی زیاد استفاده شود ($0/2 \text{ N/mm}$).
- از فرش زیر لایه‌ی بالاست جهت افزایش شکل‌پذیری بستر ریل و کاهش ارتعاشات در فرکانس‌های پایین استفاده می‌شود. همچنین به دلیل کاهش تنش وارده بر بستر ریل امکان کاهش ضخامت لایه‌ی بالاست فراهم می‌گردد.

۲- بررسی پدهای الاستیک پروژه خط ۷ متروی تهران

خط ۷ متروی تهران یکی از خطوط ۱۱ گانه شبکه راه‌آهن شهری متروی تهران است که از ورزشگاه تختی در جنوب شرقی تهران آغاز گشته و به سعادت‌آباد در شمال غرب تهران ختم می‌شود. در این بخش با توجه به گزارش‌های کلی و ارتعاش‌سنجی و نیز آزمایش‌های ارتعاش‌سنجی نمونه پدهای ارتعاشی، به بررسی گزینه‌های کاهش ارتعاش در نقاط مختلف خط ۷ مترو پرداخته شد.

است. لازم به ذکر است، الباقی این انرژی بین سیستم تعلیق وسیله نقلیه، سیستم نگه‌دارنده ریل و لایه بالاست تقسیم‌شده است (Kaewunruen & Remennikov, 2008). به‌عنوان یکی از تجربیات موفق استفاده از پدهای زیر تراورس، راه‌آهن توکایدو و شینکاسن در ژاپن بوده است. با استفاده از پدهای زیر تراورس تا سختی $68 \text{ کیلو نیوتون بر میلی‌متر ارتعاشات وارده بر لایه بالاست تا } 22\%$ کاهش‌یافته است (Pita, 2006). طبقه‌بندی دیگر بر اساس ضریب بستر در اتحادیه جهانی حمل‌ونقل ریلی (UIC)، پدهای زیر تراورس را در چهار دسته‌ی سخت ($0/25$) - معمولی ($0/35 \text{ N/mm}^3$)، و بسیار نرم (کمتر از $0/1 \text{ N/mm}^3$) تقسیم‌بندی نموده است. یکی دیگر از روش‌های مرسوم در کاهش ارتعاشات و جذب انرژی ناشی از حرکت قطار استفاده از فرش زیر بالاست است. این فرش‌ها بین لایه‌ی بالاست و تراورس بتنی نصب می‌شود. بر اساس ابعاد و چگالی، فرش‌های خاصیت جذب انرژی متفاوتی دارا می‌باشند (Teixeira, 2009). فرش‌های الاستیک بر اساس ضریب بستر دینامیکی به چهار دسته‌ی سخت ($0/22 \text{ N/mm}^3$)، معمولی ($0/09$ - $0/22 \text{ N/mm}^3$) و نرم ($0/05$ - $0/09 \text{ N/mm}^3$) و خیلی نرم ($0/03$ - $0/05 \text{ N/mm}^3$) تقسیم‌بندی می‌شوند (Code, U. I. C, 2011). در شکل ۲، نمونه‌ای از فرش الاستیک لاستیکی نشان داده شده است.



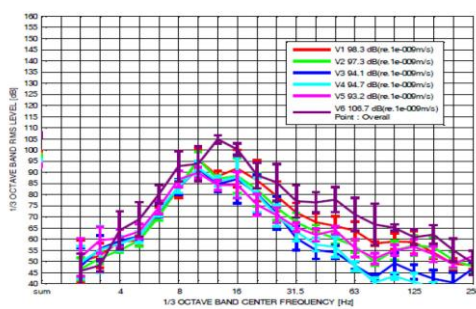
شکل ۲- فرش الاستیک لاستیکی

المان‌های الاستیک به‌عنوان یک راه‌کار مفید در جهت کاهش ارتعاشات، تغییر شکل و خرابی خطوط ریلی و صداهای ایجادشده در اثر حرکت قطار، در سالیان گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳، دو منطقه مختلف از نظر استفاده از فرش الاستیک مورد مقایسه قرار گرفته است.

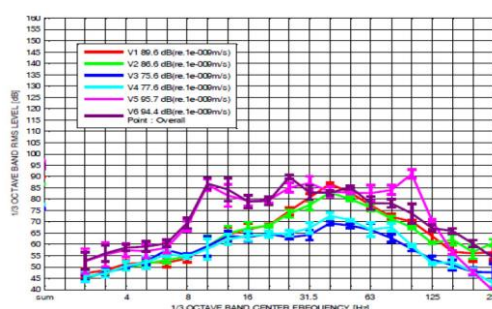
هرتز می‌شوند و میزان آن با توجه به نوع ساختمان حدود ۱۰ تا ۲۰ دسی‌بل متغیر است. نتایج آزمایش ارتعاشی خط ۷ به طور خلاصه در جدول ۱، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میزان ارتعاش در مقادیر حدود ۶ دسی‌بل بیشتر از حد مجاز هستند. شایان‌ذکر است که کنترل فرکانس برای ارائه راهکار کاهش ارتعاش بسیار حائز اهمیت است.

در مطالعاتی که شرکت *D2S* انجام داده است، میزان ارتعاش را در سطح زمین و ساختمان‌های اطراف خط ۷ در محدوده خیابان‌های بسیج و قیام در شکل ۴، قابل مشاهده است. مطابق شکل ۴ الف و ب، مشاهده می‌شود:

- فرکانس بحرانی سطح زمین در منطقه بسیج ۳۱/۵ هرتز و منطقه قیام ۱۲ هرتز است.
- ساختمان‌ها موجب تشدید در فرکانس حدود ۱۰



ب) خیابان قیام



الف) خیابان بسیج

شکل ۴- نمونه‌های اندازه‌گیری شده

جدول ۱- نتیجه آزمایش ارتعاشی خط ۷

بخش	دسته بندی	میانگین حداکثر لرزش در داخل ساختمان [db(re.1e-9m/s)]	معیار تاثیر برای رویدادهای متعدد [db(re.1e-9m/s)]	مطابقت با معیار ارتعاش FTA
S1	دسته دو	v5 = ۱۰۰/۹db v6 = ۹۴/۸db	۱۰۰	سازگار نیست
S2	دسته بندی نشده		مناسب نیست	سازگار نیست
S3	دسته دو	v6 = ۱۰۶/۷db	۱۰۰	سازگار نیست
S4	دسته دو	v5 = ۹۴/۳db	۱۰۰	سازگار
	دسته یک		۹۳	سازگار نیست
S5	دسته دو	v5 = ۹۶/۳db v6 = ۹۱/۹db	۱۰۰	سازگار
	دسته یک		۹۳	سازگار نیست
S6	دسته سه	v6 = ۹۴/۴db	۱۰۳	سازگار
S7	دسته دو	اندازه‌گیری نشده	۱۰۰	سازگار
S8	دسته دو	اندازه‌گیری نشده	۱۰۰	سازگار
	دسته یک		۹۳	سازگار

۲-۱- انتخاب راه‌کار کاهش ارتعاشات

در بررسی روش‌های کاهش ارتعاشات مترو خط ۷ با توجه به اتمام اجرای روسازی و نیز بهره‌برداری از خط، امکان مسدودی خط، تخریب دال و نصب فرش جاذب ارتعاش و یا نصب انواع دیگری از پابندها وجود ندارد. از این‌رو تنها گزینه مناسب به‌منظور کاهش ارتعاش، نصب پدهای جاذب ارتعاش در پابندها فعلی خط است. از طرفی با توجه با شرایط تحریم و مشکلات انتقال پول، برحسب دستور مجری خط، همکاری با تولیدکنندگان داخلی مطرح گردید.

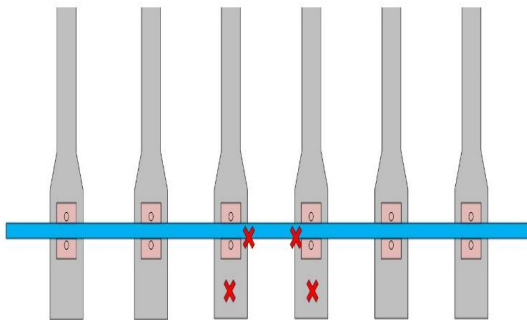
بر اساس مذاکرات با تولیدکنندگان داخلی چهار نوع پد در نظر گرفته شد، که در نهایت پد نوع سه (N3) و پد نوع چهار (N4) برای نصب در خط و انجام آزمایش ارتعاش‌سنجی مناسب تشخیص داده شدند.

ارتعاشات منتقل‌شده ناشی از عبور قطار دارای پهنایی باند گسترده‌ای از تمامی فرکانس‌ها است. تغییر در هر یک از اجزای روسازی و مسیر انتقال ارتعاش می‌تواند بر شدت نهایی ارتعاشات انتقال‌یافته تأثیرگذار باشد. در این خصوص پدهای زیر زینچه ریل به‌عنوان یکی از اولین اجزایی که با این ارتعاش روبرو می‌شوند، اهمیت بسیار بالایی در کاهش ارتعاش خواهد داشت. عملکرد این پدها به دو دلیل افزایش سطح مقطع و خواص الاستیک آن‌ها است.

۲-۲- روش انجام آزمایش

آزمایش‌های استاندارد متنوعی جهت تعیین سختی دینامیکی پدها در آزمایشگاه وجود دارد. با این حال تعیین نوع بارگذاری قطار با توجه به گستره بالای فرکانسی آن در نهایت نیازمند یک تست میدانی خواهد بود. آزمایش اندازه‌گیری میزان ارتعاش انتقال‌یافته از پدها به‌منظور تعیین کارایی و انتخاب کاندید نهایی برای تست ارتعاش ساختمان‌های مجاور مترو طراحی و اجرا گردید. با توجه به موارد ذکرشده و سطح بالای ارتعاش در این پدها، نیاز به استفاده از شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک با فرکانس طبیعی بالا است. الگوی ابزاربندی مطابق با شکل ۵، انجام‌گرفته است. یک شتاب‌سنج بر روی پاشنه ریل و یک شتاب‌سنج بر روی تراورس قرار داده می‌شود تا تنها اثر انتقال ارتعاش پدها مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌منظور اطمینان، این ابزاربندی بر روی تراورس مجاور نیز تکرار شده است. همچنین مشخصات دستگاه شتاب‌سنج در جدول ۲، به

نمایش درآمده است.



شکل ۵- نمایشی از شتاب‌سنج‌ها

جدول ۲- مشخصات دستگاه شتاب‌سنج

Model	ACI02-1A
Sensitivity ($\pm 10\%$)	100 mV/g
Frequency Response ($\pm 3\text{dB}$)	0.5-15000 Hz
Frequency Response ($\pm 10\%$)	2.0-10000 Hz
Dynamic Range	± 50 g, peak
Settling Time	<2.5 seconds
Voltage Source	18-30 VDC
Constant Current Excitation	2-10 mA
Spectral Noise @ 10 Hz	14 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise @ 100 Hz	2.3 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Spectral Noise @ 1000 Hz	2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Output Impedance	<100 ohm
Bias Output Voltage	10-14 VDC
Case Isolation	>10 ⁸ ohm

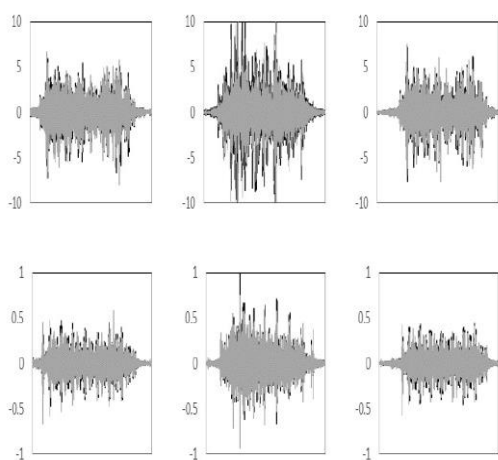
لازم به ذکر است، فرکانس داده‌برداری برابر با ۵ کیلوهرتز است و به‌منظور اطمینان بیشتر از صحت نتایج، برای هر سرعت بیش از یک‌بار عبور انجام‌شده است. روند انجام آزمایش به این‌گونه است که یک‌بار خط موجود در سرعت‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ کیلومتر برداشت گردیده و سپس با استفاده از پدهای جاذب ارتعاش نصب‌شده، برداشت مجدد در خط انجام پذیرفته است. در نهایت با توجه به رابطه ۱، میزان سرعت و شتاب در حالت پدهای معمول و پدهای جاذب ارتعاش مقایسه گردیده و میزان کاهش ارتعاش برای هر پد و هر سرعت محاسبه‌شده است.

$$\text{adjustment (dB)} = 20 * \log\left(\frac{\text{speed}}{\text{speed}_{ref}}\right) \quad (1)$$

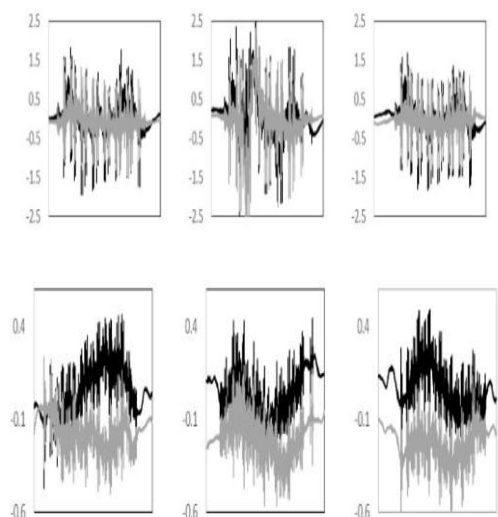
نتایج آزمایش (DMA) برای پد شماره ۳ (N3) و

تراورس برای تمامی پدهای مورد آزمایش در شکل ۱۰ الی شکل ۱۳، قابل مشاهده است.

در خصوص پد N1 در بازه‌ی فرکانسی زیر ۳۰ هرتز ارتعاش با دامنه بسیار بالای ریل ملاحظه می‌گردد که نشان‌دهنده‌ی رزونانس این پد در سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت است. همچنین افزایش سرعت تأثیر غیرخطی بر سرعت ارتعاش ثبت‌شده روی تراورس دارد. به کمک نمودارهای ارائه‌شده و اندازه‌گیری ارتعاش می‌توان نوع پد مناسب را انتخاب نمود.

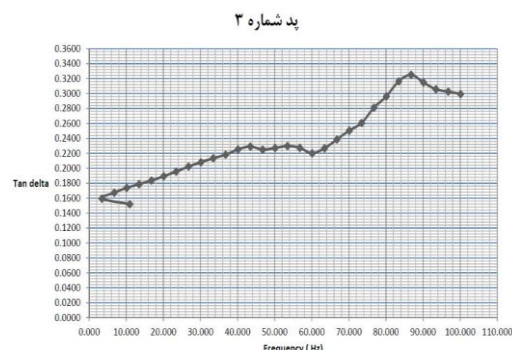


شکل ۸- مقادیر شتاب ریل (بالا) و تراورس (پایین) (به ازای سه بار عبور قطار)



شکل ۹- مقادیر سرعت ریل (بالا) و تراورس (پایین) (به ازای سه بار عبور قطار)

شماره ۴ (N4) به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷، مشاهده می‌شود.



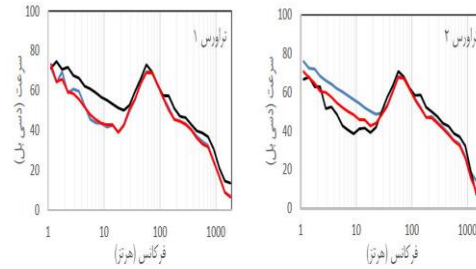
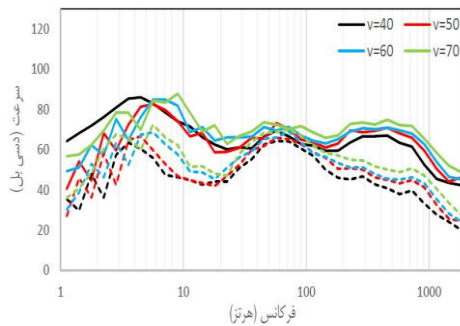
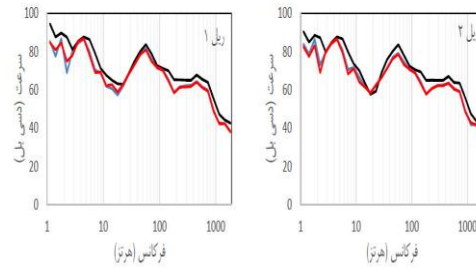
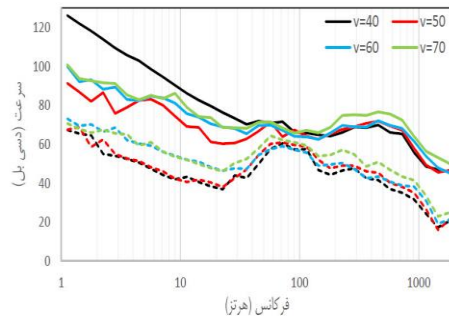
شکل ۶- نتیجه آزمایش DMA برای پد شماره ۳



شکل ۷- نتیجه آزمایش DMA برای پد شماره ۴

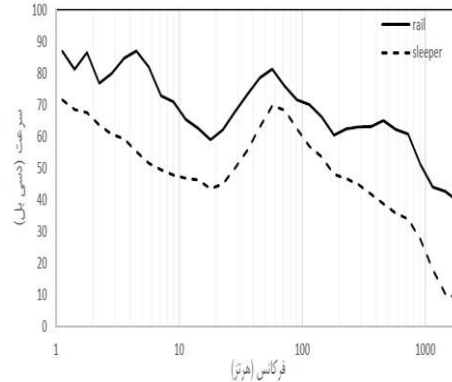
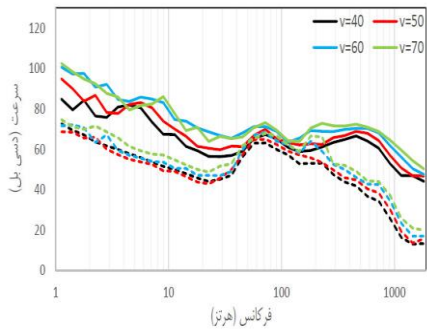
۲-۳- ارزیابی میدانی ارتعاشات پدهای زیر ریل

تحلیل داده‌های میدانی، مجموعه عملیاتی است که روی داده‌های خام برداشت‌شده توسط دستگاه اندازه‌گیر، انجام می‌شود. در شکل ۸، مقادیر شتاب (g) و در شکل ۹ مقادیر سرعت (اینچ بر ثانیه) برای ریل و تراورس به ازای سرعت عبور ۴۰ کیلومتر بر ساعت و سه بار تکرار آزمایش مشاهده می‌شود. بررسی نتایج سرعت ثبت‌شده در حوزه فرکانس این امکان را به دست می‌دهد که میزان شدت ارتعاش در تک‌تک فرکانس‌ها بررسی شده و تأثیر سرعت بر روی دامنه ارتعاش در هر فرکانس مشخص گردد. در این صورت عملکرد پدها برای تمامی فرکانس‌ها و سرعت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین گزینه انتخاب می‌شود. نتایج ارائه‌شده در این بخش به صورت باند ۱/۳ اکتاو ارائه گردیده است. شکل ۹، نمونه‌ای از سرعت ثبت‌شده را برای سه بار عبور و سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت نمایش می‌دهد و به همین ترتیب مقادیر میانگین‌گیری شده سرعت ریل و

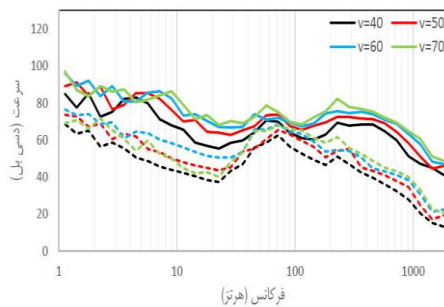


شکل ۱۰- مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت بر روی ریل و تراورس در حوزه فرکانس و باند ۱/۳ اکتاو

شکل ۱۲- تأثیر سرعت بر سرعت ارتعاش ثبت‌شده برای پد نوع N1 (بالا) و N2 (پایین) منحنی توپر (ریل) و خط‌چین (تراورس)



شکل ۱۱- مقدار میانگین نهایی اندازه‌گیری شده برای سرعت ریل و تراورس برای سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت



شکل ۱۳- تأثیر سرعت بر سرعت ارتعاش ثبت‌شده برای پد نوع N1 (بالا) و N2 (پایین) منحنی توپر (ریل) و خط‌چین (تراورس)

۳- نتیجه گیری

در فضای زمان و فرکانس مورد تحلیل قرار گرفت. در انجام آزمایش، دو تراورس مجاور انتخاب و ابزاربندی گردید. در مجموع ۴ نوع پد زیر ریل شامل پد با کدهای N1 تا N4 مورد آزمون میدانی قرار گرفت. نتایج تحلیل به صورت خلاصه به شرح زیر است:

پد نوع N1 بر اثر عبور قطار به ویژه در سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت دچار ارتعاشات غیرطبیعی (رزونانس) شده و از این منظر استفاده از آن برای این خط و سرعت به دلیل آسیب احتمالی به جوش ها و ریل توصیه نمی گردد.

پد نوع N2 (کامپوزیت) عملکردی تقریباً مستقل از سرعت دارد. پدهای نوع N3 و N4 عملکرد نسبتاً مطلوبی دارند. در خصوص نتایج تحلیل در حوزه فرکانس نیز میزان عملکرد هر پد برای فرکانس و سرعت محاسبه شده و با توجه به فرکانس ارتعاش ساختمان های مجاور امکان انتخاب پد مناسب فراهم می گردد.

در این تحقیق به بررسی معیاری جهت انتخاب پد زیر ریل جهت انجام تست ارتعاش سنجی ساختمان های مجاور خطوط مترو پرداخته شد. شتاب ریل و تراورس در محل تونل خط ۷ متروی تهران در محدوده بسیج با عبور قطار در سرعت های مختلف برداشته شده و مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. به طور کلی اهداف اندازه گیری شتاب در دو سمت پد زیر ریل را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- تعیین میزان ارتعاشات ایجاد شده ناشی از عبور قطار در محل خط.
- بررسی تأثیر پدهای زیر ریل بر کاهش یا تقویت ارتعاشات.

با بررسی ارتعاش ثبت شده در قبل و بعد از استفاده از پد ارتعاشی می توان عملکرد آن را به صورت میدانی و در شرایط واقعی مورد ارزیابی اولیه قرارداد. نتایج شتاب اندازه گیری شده با انتگرال گیری به سرعت تبدیل شده و نتایج

۴- مراجع

- Costa, P. A., Calçada, R., & Cardoso, A. S. (2012). Ballast mats for the reduction of railway traffic vibrations. Numerical study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42, 137-150.
- Code, U. I. C. (2011). 719-1. Recommendations for the Use of under Ballast Mats. UBM 1st ed. VII Way and Works.
- Heydari Nougabi, H., Ismaili, M., Zakiri Sardroudi, J., Varandas, J.N.(2016). Numerical investigation of the effect of the hardness of the pad under the rail on the dynamic behavior of the rail line in the transition area from the slab to the ballast line. *The 5th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering*
- Hunt GA. (2000). Eurobalt optimises ballasted track. *Railway gazette international*, December p. 813-6.
- Ito, M., & Nagai, K. (2008). Degradation issues of polymer materials used in railway field. *Polymer Degradation and Stability*, 93(10), 1723-1735.
- Kaewunruen, S. (2014). Impact damage mechanism and mitigation by ballast bonding at railway bridge ends. *The International Journal of Railway Technology*, 3(4), 1-22.
- Kaewunruen, S., & Remennikov, A. M. (2006). Sensitivity analysis of free vibration characteristics of an in situ railway concrete sleeper to variations of rail pad parameters. *Journal of Sound and Vibration*, 298(1-2), 453-461.
- Kaewunruen, S., & Remennikov, A. (2008). An experimental evaluation of the attenuation effect of rail pad on flexural behaviour of railway concrete sleeper under severe impact loads. *Journal of Sound and Vibration*, 299, 445.

- Kaewunruen, S., You, R., & Ishida, M. (2017). Composites for timber-replacement bearers in railway switches and crossings. *Journal of Sound and Vibration*. Infrastructures, 2(4), 13.
- Loy, H. (2009). Under sleeper pads in turnouts. *Railway Technical Review*, 2, 35-38.
- Lopez Pita A. (2006). Infraestructuras ferroviarias. Edicions UPC, *Universidad Politecnica de Cataluna, Barcelona*.
- Nimbalkar, S., Indraratna, B., Dash, S. K., & Christie, D. (2012). Improved performance of railway ballast under impact loads using shock mats. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 138(3), 281-294.
- Ouakka, S., Verlinden, O., & Kouroussis, G. (2022). Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices. *Railway Engineering Science*, 30(1), 1-22.
- Prud'homme, A. (1978). Forces and behavior of railroad tracks at very high train speeds; standards adopted by SNCF for its future high speed lines (250 to 300 km/h). *Railroad track mechanics and technology*, 79-108.
- Pita, L. (2001). The vertical stiffness of the track and the deterioration of high speed lines [La rigidez vertical de la via y el deterioro de las lineas de alta velocidad]. *Revista de obras públicas*, 148(3415), 7-26.
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2014). Viability analysis of deconstructed tires as material for rail pads in high-speed railways. *Materials & Design*, 64, 407-414.
- Teixeira, P. F. (2009, June). State-of-the-Art on the use of bituminous subballast on european high-speed rail lines. In Workshop on Railroad Track Design Including Asphalt Track-bed, BCR2A conference-Eight International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. *The University of Illinois at Urbana-Campaign (USA)*.
- Vogiatzis KE, Kouroussis G (2017) Environmental Ground-Borne Noise and Vibration from Urban Light Rail Transportation During Construction and Operation. *Curr Pollut Rep* 3:162–173.
- Witt S. (2008). The influence of under sleeper pads on railway track dynamics. In: Proceedings of *Linkoping University, Department of Management and Engineering, Division of Solid Mechanics, Sweden*
- Wang, R., Jing, G., Wang, B., Tavakol, M., & Nateghi, Y. (2023). Under ballast mat—A review of recent developments, limitations, and future prospects. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*, 09544097221150494.
- Wu, L. X., Qu, S. Y., Zhang, J., & Hou, X. M. (2011). Research Progress and Prospect to Civil Engineering Structure Passive Control. *Advanced Materials Research*, 243, 5062-5066.
- Zakeri, J.A., Esmaeili, M., & Heydari-Noghabi, H. (2016). A field investigation into the effect of under sleeper pads on the reduction of railway-induced ground-borne vibrations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(3), 999-1005

Vibration control using energy absorbing elastic pads - A case study: Line 7 of Tehran metro

M. Fayyaz^{1*}; M. Dehghannezhad Saniabadi²

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Imam Hossein University, mfayyaz@ihu.ac.ir

2- MSc Student, Ivanki University, Iran, mahdi.deh1378@gmail.com

Received: 8 AUG 2021; Accepted: 24 Sep 2023

DOI: 10.22044/tuse.2023.10829.1425

Keywords

Vibrations
Urban transportation
Elastic pads
Energy absorbing pads
Underground space
Tehran Metro Line 7

Extended Abstract

Summary

One of the environmental effects of urban transportation systems like metro is the generation of unwanted vibrations. These vibrations are disturbing due to the high frequency of train crossings and the location of residential structures in the vicinity of inner-city railways. Any solutions to reduce vibrations due to the movement of urban trains should take into account the nature of the desired vibration frequency. There are several ways to isolate and control

these vibrations. Using elastic pads along the rail line is a new way of reduction of the vibrations. In this research, the vibration transmitted to the ground in the vicinity of Tehran Metro Line number 7 has been measured, calculated and compared with the permissible values. Moreover, by examining energy absorbing pads as an effective method in reducing the hazards caused by vibrations, their role in reducing the vibrations of the transportation system in Tehran Metro Line 7 has been studied. For this study, 4 types of pads have been employed. The results of field measurements confirm the effect of the introduced pad in reducing vibrations to an acceptable level.

Introduction

There are various standard tests to determine the dynamic hardness of pads in the laboratory. However, determining the type of train loading due to its high frequency range will ultimately require a field test. The test to measure the amount of vibration transmitted from the pads was designed and implemented in order to determine the efficiency and select the final candidate for the vibration test of the buildings adjacent to the subway. According to the mentioned cases and the high level of vibration in these pads, it is necessary to use piezoelectric accelerometers with high natural frequency. An accelerometer is placed on the heel of the rail and an accelerometer on the traverse to evaluate only the vibration transmission effect of the pads. To obtain reliable results, this instrumentation is also placed on the adjacent traverse. Finally, in order to further ensure the accuracy of the results, more than one pass has been made for each speed. The process of conducting the test is such that once the existing line is tested at speeds of 40, 50, 60 and 70 km, then using the installed vibration absorbing pads, re-implantation is done on the line.

Methodology and Approaches

By using field data analysis and examining the results of recorded speed in the frequency domain, we check the intensity of vibration in each frequency and determine the effect of speed on the vibration amplitude in each frequency. In this case, the performance of the pads is evaluated for all frequencies and speeds, and based on the results, the best option is selected. Using the pad with the code or type N1, in the frequency range below 30 Hz, a very high amplitude vibration of the rail is observed, indicating that the resonance of this pad is at a speed of 40 kilometers per hour. Furthermore, increasing the speed has a non-linear effect on the vibration speed recorded on the traverse. With the help of presented diagrams and vibration measurements, we can choose the right type of pad.

Results and Conclusions

In this research, a criterion for choosing the pad type under the rail to perform vibrometric test of buildings adjacent to subway lines was examined. Acceleration of rail and traverse at the tunnel location of line 7 of Tehran metro in the area of Basij was analyzed and evaluated by passing train at different speeds. In general, the objectives of measuring the acceleration on both sides of the pad under the rail were to determine the vibrations caused by the passage of the train on the track, and to investigate the effect of under-rail pads on reducing or amplifying vibrations.

By examining the recorded vibrations before and after using the pad, its performance can be evaluated in the real conditions of the field. The measured acceleration was converted to velocity by integration and the results were analyzed in time and frequency space. In this experiment, two adjacent traverses were selected and instrumented. A total of 4 types of under-rail pads, including pads with codes or types N1 to N4, were tested in the field. The results of the analysis are summarized as follows:

- The N1 type pad experiences unnatural vibrations (resonance) due to the passing of a train, especially at a speed of 40 km/h, and hence, it is not recommended to use it for this line and speed due to possible damage to the welds and rails.
- The N2 (composite) type pad has an almost speed-independent performance.
- The N3 and N4 type pads have relatively favorable performance.

Considering the results of the analysis in the frequency domain, the performance of each pad is calculated for each frequency and speed, and according to the vibration frequency of the adjacent buildings, the appropriate pad is selected.
