

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: ۱۲۹ تا ۱۳۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.10829.1425

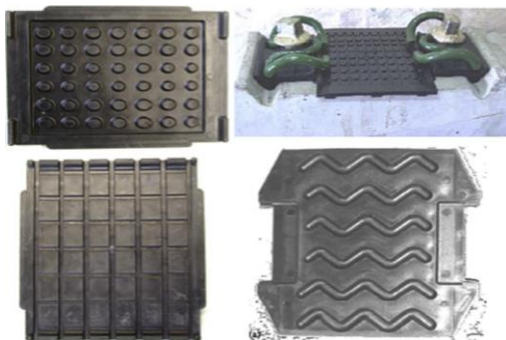
واژگان کلیدی	چکیده
ارتعاشات حمل‌ونقل شهری پد الاستیک پدهای جاذب انرژی خط هفت مترو تهران	یکی از آثار زیست‌محیطی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری ایجاد ارتعاشات ناخواسته است. این ارتعاشات به علت تواتر بالای عبور قطارها و قرارگیری کاربری‌های مسکونی در مجاورت خطوط ریلی درون‌شهری از عوامل ایجاد مزاحمت می‌باشند. راهکارهای 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: ۰۹۱۲۵۳۹۰۴۵۵؛ شماره تلفن: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱

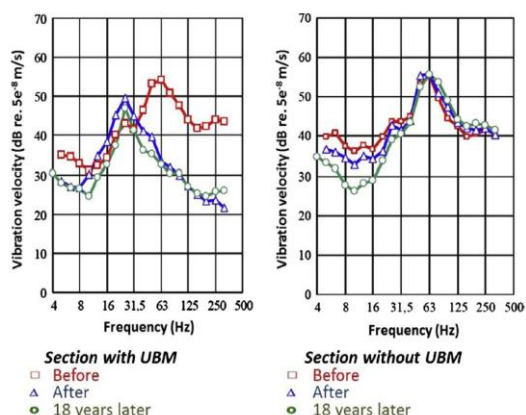
(Kaewunruen, et al., 2017). در این تحقیق، ضمن معرفی روش نوین کاهش ارتعاشات، معیارهای انتخاب پد بهینه و نحوه‌ی به‌کارگیری المان‌های الاستیک در کاهش این ارتعاشات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها با مطالعه پروژه خط ۷ متروی تهران، تأثیر ریل پدها در کنترل ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه استفاده 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 گاه 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 نامتقارن، 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 (Nagai Ito, 2008)؛ (Xiang Wu, et al., 2011). 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

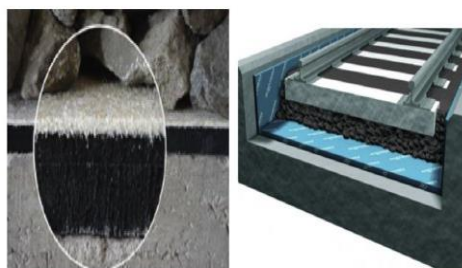
شکل ۳- مقایسه ارتعاش لایه‌ی بالاست قبل و بعد از استفاده از فرش زیربلاست

- 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 ۶۸ کیلو نیوتون بر میلی‌متر ارتعاشات وارده بر لایه بالاست تا ۲۲٪ 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.



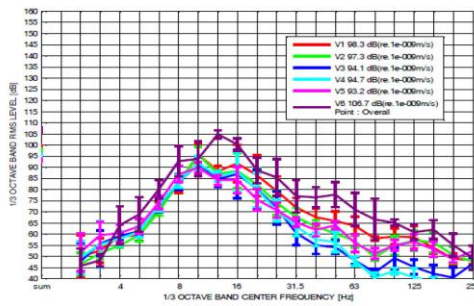
شکل ۲- فرش الاستیک لاستیکی

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.

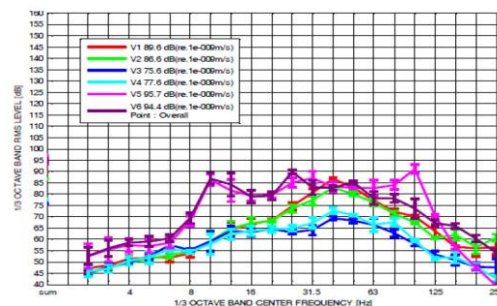
هرتز می‌شوند و میزان آن با توجه به نوع ساختمان حدود ۱۰ تا ۲۰ دسی‌بل متغیر است. نتایج آزمایش ارتعاشی خط ۷ به طور خلاصه در جدول ۱، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میزان ارتعاش در مقادیر حدود ۶ دسی‌بل بیشتر از حد مجاز هستند. شایان‌ذکر است که کنترل فرکانس برای ارائه راهکار کاهش ارتعاش بسیار حائز 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 = 100/9db v6 = 94/8db	100	سازگار نیست
S2	دسته بندی نشده		مناسب نیست	سازگار نیست
S3	دسته دو	v6 = 106/7db	100	سازگار نیست
S4	دسته دو دسته یک	v5 = 94/3db	100 93	سازگار سازگار نیست
S5	دسته دو دسته یک	v5 = 96/3db v6 = 91/9db	100 93	سازگار سازگار نیست
S6	دسته سه	v6 = 94/4db	103	سازگار
S7	دسته دو	اندازه‌گیری نشده	100	سازگار
S8	دسته دو دسته یک	اندازه‌گیری نشده	100 93	سازگار 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 این رو تنها گزینه مناسب به منظور 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.

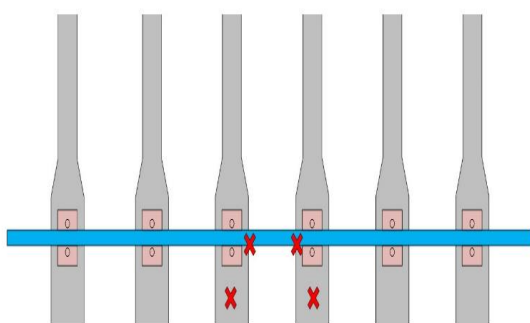
بر اساس مذاکرات با تولیدکنندگان داخلی چهار نوع پد در نظر گرفته شد، که در نهایت پد نوع سه (N3) و پد نوع چهار (N4) برای نصب در خط و انجام آزمایش ارتعاش‌سنجی مناسب تشخیص داده شدند.

ارتعاشات منتقل شده 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 انتقال یافته 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 انتقال یافته از پدها به منظور تعیین کارایی و انتخاب کاندید نهایی برای تست ارتعاش ساختمان‌های مجاور مترو طراحی و اجرا گردید. با توجه به موارد ذکر شده و سطح بالای ارتعاش در این پدها، نیاز به استفاده از شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک با فرکانس طبیعی بالا است. الگوی ابزاربندی مطابق با شکل ۵، انجام گرفته 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. به منظور اطمینان، این ابزاربندی بر روی تراورس مجاور نیز تکرار شده است. همچنین مشخصات دستگاه شتاب‌سنج در جدول ۲، به

نمایش درآمده است.



شکل ۵- نمای 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

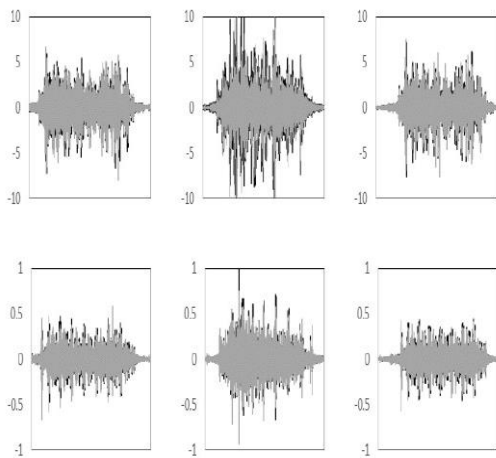
لازم به ذکر است، فرکانس داده‌برداری برابر با ۵ کیلوهرتز است و به منظور اطمینان بیشتر از صحت نتایج، برای هر سرعت بیش از یک‌بار عبور انجام شده است. روند انجام آزمایش به این‌گونه است که یک‌بار خط موجود در سرعت‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ کیلومتر برداشت گردیده و سپس با استفاده از پدهای جاذب ارتعاش نصب شده، برداشت 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 محاسبه شده است.

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

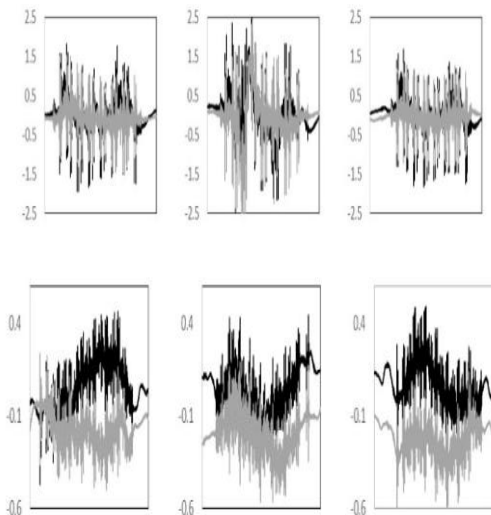
نتایج آزمایش (DMA) برای پد شماره ۳ (N3) و

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.

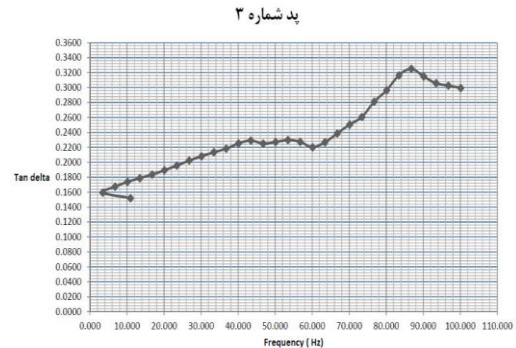


شکل ۸- مقادیر شتاب ریل (بالا) و تراورس (پایین) (به ازای سه بار عبور قطار)



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.



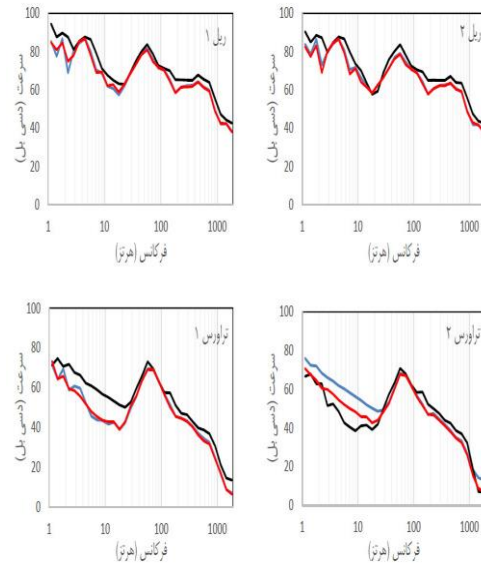
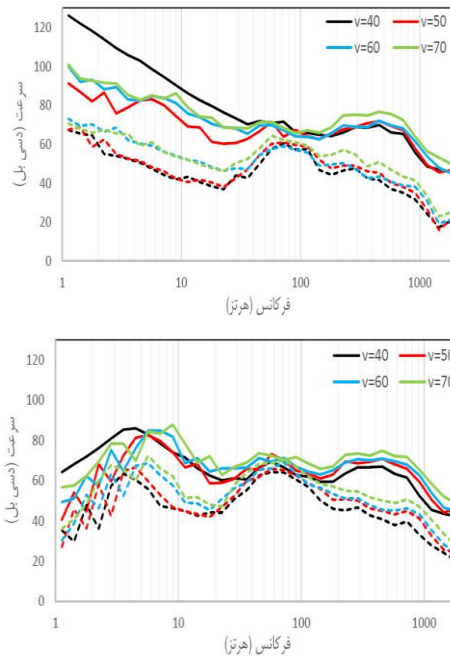
شکل ۶- نتیجه آزمایش DMA برای پد شماره ۳



شکل ۷- نتیجه آزمایش DMA برای پد شماره ۴

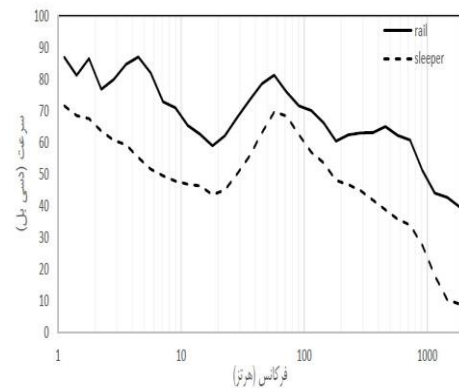
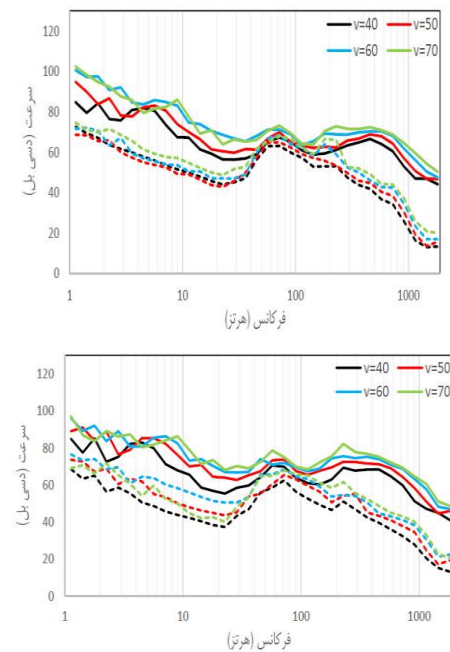
۲-۳- ارزیابی میدانی ارتعاشات پدهای زیر ریل

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 بررسی‌شده 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., Esmaili, 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