

تحلیل و تست نرخ زوال ارتعاشات در خط آهن بالاستی

حبيب اله ملاطفي*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
سروش ایزدبخش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: molatefi@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۲۴ - پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۰۶

چکیده

ریل به عنوان یکی از منابع غالب تولیدکننده نویز در راه آهن در سرعت‌های معمول (تا ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت) شناخته شده است. مدل‌های تئوری نویز غلتشی نشان داده‌اند که نرخ زوال ارتعاشات در طول ریل، طول مؤثر انتشار نویز را کنترل می‌کند و در نتیجه ارتباط مستقیمی با انتشار نویز ریل دارد. در این مقاله، به بررسی نرخ زوال ارتعاشات و ارتباط آن با نویز ریل به کمک مدل‌سازی المان محدود و اندازه‌گیری میدانی پرداخته شده است. ریل با تکیه‌گاه‌های متناوب که معرف ریل بالاستی می‌باشد، در نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و پس از تحلیل، پاسخ ارتعاشی ریل استخراج شده و نرخ زوال در هر باند فرکانسی ۱/۳ اکتاو محاسبه شده است. همچنین توسط دو شتاب‌سنج، یکی روی محل تراورس و دیگری در محل بین تراورس‌ها روی خط متروی صادقیه اندازه‌گیری میدانی انجام شده و نرخ زوال عمودی خط به دست آمده است. مقایسه نتایج نرخ زوال به دست آمده از مدل‌سازی المان محدود و اندازه‌گیری میدانی، مطابقت خوبی را نشان داده است. همچنین مطابق نتایج اندازه‌گیری میدانی، در فرکانس‌های پایین فرکانس قطع، نرخ زوال مربوط به شتاب‌سنج در محل تراورس از نرخ زوال مربوط به شتاب‌سنج در محل بین تراورس‌ها، تقریباً ۲ دسی‌بل کمتر می‌باشد ولی در فرکانس‌های بالای فرکانس قطع نتایج مربوط به دو شتاب‌سنج تقریباً منطبق بر یکدیگر می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: نویز ریل در راه آهن، نویز غلتشی، نرخ زوال، المان محدود، فرکانس قطع

۱- مقدمه

در راه آهن، منابع نویز متفاوتی وجود دارد که در شرایط مختلف منبع غالب متفاوت می‌باشد. با این وجود، نویز غلتشی^۱ با اهمیت‌ترین منبع در راه آهن می‌باشد که حاصل اندرکنش چرخ و ریل در خط مستقیم است. منابع دیگر در راه آهن شامل نویز ضربه‌ای^۲، نویز جیغ قوس^۳، نویز ترکشن و نویز ایرودینامیک می‌باشند. اولین قدم در کنترل نویز شناخت منابع غالب نویز است. بعد از تعیین منبع غالب، سهم اجزای مختلف وسیله نقلیه در تولید نویز باید شناسایی شود. در غیر این صورت، ممکن است تلاشی که صرف کاهش یکی از اجزای تولیدکننده نویز می‌شود، منجر به کاهش نویز کلی نشود. قدم بعدی در فرایند کنترل نویز،

راه آهن نسبت به دیگر روش‌های حمل و نقل از جهت فاکتورهای زیست‌محیطی مانند مصرف انرژی کمتر و آلودگی کمتر برتری دارد و با آمدن نسل قطارهای سرعت بالا، می‌تواند با حمل و نقل هوایی نیز رقابت کند. با این وجود، نارضایتی‌هایی که در ارتباط با راه آهن وجود دارد، اغلب متمرکز بر مبحث نویز آن می‌باشد. همچنین، از لحاظ پارامترهای فیزیولوژیکی مربوط به خواب بر خلاف انتظار، تأثیر نویز راه آهن بیشتر از دو نویز ترافیک هوایی و جاده‌ای می‌باشد (Griefahn et al., 2006). بنابراین، برای توسعه حمل و نقل ریلی و حفظ جایگاه آن، کاهش نویز راه آهن امری ضروری است.

در بین سرعت ۴۰ تا (کیلومتر بر ساعت) ۲۵۰ نويز غلتشی نسبت به ديگر منابع نويز (نويز ايروديناميک، نويز ضربه‌ای و نويز جيج چرخ-ريل) منبع غالب شناخته شده است (Thompson, 2009). نويز غلتشی به‌وسيله اندرکنش چرخ و ريل در ناحيه تماس توليد می‌شود و هر دو ی آنها نسبت قابل توجهی از نويز را منتشر می‌کنند. مطالعاتی برای شناسایی اینکه چرخ یا ريل، هر یک چه سهمی در توليد نويز غلتشی دارند، انجام شده است. اولين مدل تئوری برای نويز غلتشی توسط Remington ارائه شد که بر اساس ناهمواری ريل و چرخ می‌باشد که باعث ارتعاشات یکی نسبت به دیگری و انتقال این ارتعاشات به سازه شده و در نتیجه باعث انتشار نويز می‌شود (Remington, 1987). این مدل توسط Thompson تکمیل شد و تحقیقات بعدی توسط ERRI^۴ انجام شد که نتیجه این تحقیقات به‌صورت یک مدل تخمینی در نرم‌افزار TWINS^۵ گردآوری شد. رفتار نويز غلتشی انواع چرخ و ريل، بر اساس زبری چرخ/ريل، امکان‌پذیر می‌باشد. هر دو منبع چرخ و ريل به‌عنوان منابع قابل توجه توليد نويز غلتشی، شناخته شده‌اند. با این وجود نتایج تحقیقات در شرایط مختلف نشان داده است که چرخ فقط در فرکانس‌های بالا (بالای فرکانس ۱/۵ کیلوهرتز) سهم قابل توجهی نسبت به ريل در نويز کلی دارد (Thompson, 2009). در حالی که ريل، تقریباً در همه فرکانس‌ها منبع حائز اهمیتی می‌باشد.

۳- رابطه بین نرخ زوال^۶ و نويز

انتشار موج سازه‌ای در سازه تیر می‌تواند منجر به انتشار نويزهای ناخواسته می‌شود (Thompson, 2009). سازه‌ای تیر شکل مانند ريل راه آهن، اغلب طول بلندی دارند و در رنج فرکانس شنوایی رفتار آنها به‌جای رفتار مودال، به‌وسيله موج‌های پیش‌رونده بیان می‌شود. در یک تیر با میرایی کم، موج‌های سازه‌ای تا فواصل زیادی انتشار می‌یابند و ممکن است باعث انتشار نويز، خیلی دورتر از منبع نويز شوند. با نگاهی به محاسبات توان، صوت توليد شده از ريل، با توجه به اینکه ارتعاشات ريل در طول ريل یکنواخت نیست در نظر گرفتن نرخ کاهش دامنه ارتعاشات ريل با فاصله ضروری می‌باشد. عبارت کلی برای محاسبه توان صوت W انتشار یافته از یک سازه مرتعش، به شکل زیر برای یک ريل بی‌نهایت نوشته می‌شود.

شامل توسعه و اعمال طراحی‌های با نويز کمتر و بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای طراحی، با استفاده از مدل‌های تئوری می‌باشد که توسط آن پارامترهای مختلف که تأثیرگذار هستند، شناسایی می‌شوند.

در اینجا به‌طور مشخص ريل به‌عنوان یکی از اجزای غالب توليدکننده نويز راه آهن مورد توجه می‌باشد. تاکنون برای مطالعه پارامترهای تأثیرگذار بر توليد نويز ريل و پارامترهایی که ارتعاشات ريل را به انتشار نويز ريل مربوط می‌سازد، مدل‌های تئوری بر اساس ارتعاشات تیر اولر برنولی و تیر تیموشنکو ارائه شده است. برای مثال، بر اساس مدل Heckl یک تیر بی‌نهایت تیموشنکو متصل به تعداد محدودی تکیه‌گاه جدا از هم با فاصله d می‌باشد که هر کدام دارای سختی دینامیکی وابسته به فرکانس می‌باشد و هر تکیه‌گاه به‌صورت یک نیروی عکس‌العمل که متناسب با جابه‌جایی تیر در آن نقطه است، اعمال می‌شود (Heckl, 2002). به کمک این مدل می‌توان به فرکانس‌هایی که در آن شکل موج‌ها به‌صورت pinned-pinned هستند، پی برد. مودهای pinned-pinned وقتی اتفاق می‌افتد که فاصله بین تراورس‌ها نصف طول موج باشد که برای یک ريل UIC60 با فاصله تراورس ۰/۶ متر، این اتفاق تقریباً در فرکانس ۱ کیلوهرتز می‌افتد (Maes, Sol, 2003). در این فرکانس دامنه ارتعاشات در بین تراورس‌ها بیشترین مقدار خود را دارد. در حالی که در بالای تراورس کمترین مقدار می‌باشد و وقتی پد سخت‌تر باشد، تأثیر تکیه‌گاه‌های متناوب، خود را نشان می‌دهد (Thompson, 2009).

در اینجا از شبیه‌سازی آنچه که در اندازه‌گیری نرخ زوال به‌صورت عملی روی ريل انجام می‌شود، در نرم‌افزار المان محدود بهره گرفته شده است. به این منظور، به ارایه مدل المان محدود ريل با تکیه‌گاه‌های متناوب در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شده است. سپس نرخ زوال از پاسخ‌های مدل سازی المان محدود در حوزه فرکانس، محاسبه شده است. در ادامه، تست میدانی در خطوط متروی صادقیه به منظور اندازه‌گیری نرخ زوال خط متروی سایت صادقیه انجام شد.

۲- منبع نويز غالب در راه آهن

همان‌طور که گفته شد، اولین قدم در کنترل نويز شناخت منابع غالب نويز می‌باشد که در خصوص راه آهن در خیلی از شرایط و

انتشار نویز ریل‌های معمول که سطح مقطع آن به‌ندرت تغییر می‌کند، معیار مناسبی می‌باشد.

۴- مدل‌سازی المان محدود

یکی از روش‌های مدل کردن پدیده انتشار موج، حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل حرکت با توجه به شرایط مرزی می‌باشد. روش دیگر برای حل این مسئله، حل عددی می‌باشد که مزیت اصلی این روش در حل آسان‌تر مسایلی است که دارای پیچیدگی‌های هندسی هستند. به‌طور کلی دو روش عددی وجود دارد: یکی روش المان محدود و دیگری روش المان مرزی^۷ می‌باشد. مزیت روش المان مرزی در این است که تنها مرز مدل مورد نظر نیاز به گسسته‌سازی دارد و بدین ترتیب یک بعد را در مسئله عددی کاهش می‌دهد (Moser et al., 1999). با این وجود تعداد زیادی از نرم‌افزارهای تجاری المان محدود، موجود می‌باشد که نیاز به نوشتن و به‌دست آوردن کدی جدید را متنی می‌کنند و امکاناتی نظیر پیش و پس پردازش داده‌ها را فراهم می‌آورند.

در اینجا، پاسخ ارتعاشی ریلی به‌صورت متقارن به طول ۱۶ متر در فواصل مختلف، در اثر تحریک ضربه به‌منظور محاسبه نرخ زوال ارتعاشات توسط مدل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. ریل مطابق با پروفیل ریل UIC60 در نرم‌افزار ABAQUS به‌صورت سه بعدی با المان‌های آجری، مدل شده است. شرایط مرزی در طرف اعمال ضربه به‌صورت شرایط مرزی متقارن و در طرف دیگر از المان‌های بی‌نهایت^۸ سه بعدی به‌منظور به حداقل رساندن بازتابش موج، استفاده شده است.

تکیه‌گاه‌ها به‌صورت متناوب که شامل پدها، تراورس و بالاست می‌باشد، به‌صورت مجموعه‌ای از جرم - فنر مدل‌سازی شده‌اند. پارامترهای مورد استفاده شده بر ای خط برگرفته از پارامترهای سایتی می‌باشد که جونز و همکاران (۲۰۰۶) اندازه‌گیری‌ها را روی آن انجام داده‌اند (Jones, Thompson and Diehl, 2006). در این مدل تراورس‌ها به‌صورت جرم متمرکز مدل شده‌اند که به‌وسیله اتصالات صلب به پدها متصل شده‌اند (شکل ۱). عرض تکیه‌گاه‌ها به‌اندازه ۲۰ سانتی‌متر (عرض معمول تراورس‌ها) و فاصله آنها از هم ۰/۶ متر در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای مورد استفاده برای ریل و تراورس مطابق با جدول ۱ می‌باشد. پدها و

$$W = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \sigma P \int_{-\infty}^{\infty} |v(x)|^2 dx \quad (1)$$

که در آن $v(x) = i\omega u(x)$ دامنه سرعت در x ، $\rho_0 c_0$ امپدانس آکوستیکی هوا و σ نسبت انتشار می‌باشد که وابسته به فرکانس است. ضریب $\{1/2\}$ به منظور به‌دست آوردن مقدار rms دامنه سرعت در فرمول آورده شده است. P محیط سطح مقطع می‌باشد. اگر یک مدل ساده تیر برای ارتعاشات ریل در نظر گرفته شود، از معادله حرکت تیر اولر برنولی داریم:

$$W = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \sigma P \frac{|v(0)|^2}{2} \int_0^{\infty} |e^{-ikx} - e^{-kx}|^2 dx \quad (2)$$

سرعت $v(0)$ در نقطه تحریک به‌وسیله اندرکنش چرخ - ریل تعیین می‌شود. دامنه هر موج $v(0)/\sqrt{2}$ می‌باشد. اگر مدل تیر تیموشنکو استفاده شود، اعداد موج (k) در دو عبارت نمایی کمی تغییر می‌کنند. بالای فرکانس قطع مربوط به موج‌های پیش رونده، موج‌های کاهیده به علت اینکه به سرعت با فاصله x زوال پیدا می‌کنند، سهم کمی در انتگرال دارند. بنابراین، عبارت بالا به‌صورت زیر در می‌آید:

$$W = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \sigma P |v(0)|^2 \int_0^{\infty} |e^{-ikx}|^2 dx \quad (3)$$

برای مقادیر مختلف اعداد موج $\vec{k} = k_r + ik_i$ (با k_i منفی)، انتگرال بالا به شکل زیر در می‌آید:

$$W = \frac{\rho_0 c_0 \sigma P |v(0)|^2}{-4k_i} \quad (4)$$

قسمت موهومی عدد موج، k_i ، متناسب است با نرخ زوال بر حسب dB/m به‌صورت $\Delta k_i = -8/6\sqrt{6}$. بنابراین، با گرفتن دسی بل از توان صوتی به‌دست می‌آید:

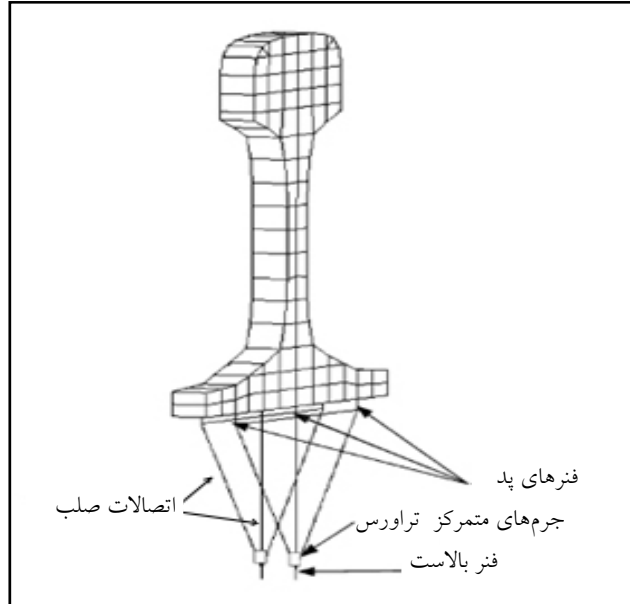
$$L_W = 10 \log_{10} \left(4.343 \rho_0 c_0 P \frac{v_{ref}^2}{W_{ref}} \right) + 10 \log_{10} \sigma + 10 \log_{10} \left(\frac{|v(0)|^2}{2v_{ref}^2} \right) - 10 \log_{10} \Delta \quad (5)$$

که در آن:

W_{ref} مقدار مرجع استفاده شده برای تعریف تراز توان صوتی، می‌باشد و v_{ref} نیز مقدار مرجع متناظر با آن برای سرعت است. اولین عبارت در معادله بالا مقداری ثابت می‌باشد. جدای از این مقدار L_W مرتبط با اندیس انتشار تراز سرعت و نرخ زوال به‌وسیله عبارت $10 \log_{10} \Delta$ می‌باشد. بنابراین، دو برابر شدن نرخ زوال کاهش ۳dB انتشار نویز را به همراه دارد. اگرچه کارایی آکوستیکی ریل وابسته به پارامترهای دیگر نظیر نسبت انتشار و غیره می‌باشد. با این وجود، نرخ زوال برای بررسی

بالاست به صورت فنر و دشیپات که پارامترهای آنها در جدول ۲ آورده شده است، مدل شده اند. باید توجه داشت که در اینجا از میرایی ویسکوز (دشیپات) برای مدل کردن میرایی پدها و بالاست استفاده شده است. انتخاب مناسب برای C می تواند از فرمول $C = \eta \omega_0$ تعیین شود (Thompson, 2009). که در اینجا با استفاده از مقادیر مرجع (Jones, Thompson and Diehl, 2006)، $\eta = 0.06$ و $\omega_0 = 2\pi * 300$ به ترتیب برای η و ω_0 مقدار C برابر با 6370 Ns/m به دست می آید (جدول ۲).

بالاست به صورت فنر و دشیپات که پارامترهای آنها در جدول ۲ آورده شده است، مدل شده اند. باید توجه داشت که در اینجا از میرایی ویسکوز (دشیپات) برای مدل کردن میرایی پدها و بالاست استفاده شده است. انتخاب مناسب برای C می تواند از فرمول $C = \eta \omega_0$ تعیین شود (Thompson, 2009). که در اینجا با استفاده از مقادیر مرجع (Jones, Thompson and Diehl, 2006)، $\eta = 0.06$ و $\omega_0 = 2\pi * 300$ به ترتیب برای η و ω_0 مقدار C برابر با 6370 Ns/m به دست می آید (جدول ۲).



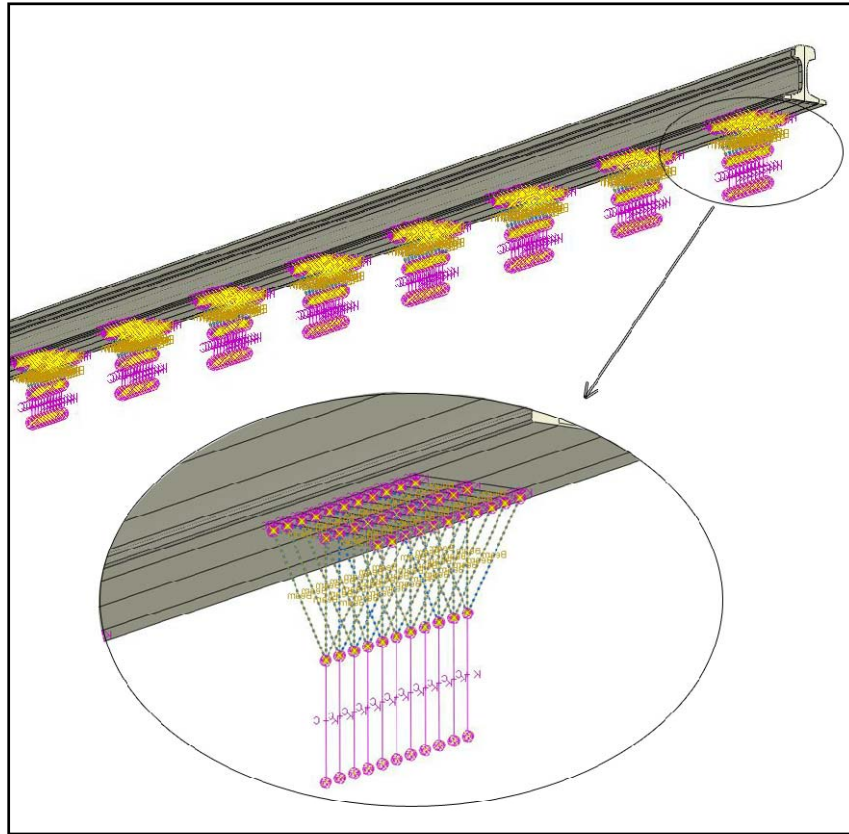
شکل ۱. مدل المان محدود همراه با پد، تراورس و بالاست

جدول ۱. پارامترهای مدل ریل UIC60. (Brown, Byrne, 2005)

E(GPa)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	ν	
۲۱۰	۷۸۵۰	۰/۳	ریل
طولی	عمودی	جانبی	۱/۲ تراورس (125kg)
۱/۱۴	۱/۳۲	۰/۶۴	I(kg ^۲)

جدول ۲. مشخصات المان های فنر- دمپر بالاست و پد (KABO et al., 2006)

بالاست	پد	خط بالاستی با تراورس تک بلوکه
۱۵۰	۲۰۰	سختی (MN/m)
۰/۵	۰/۰۶	ضریب افت
۵۰۹۱	۶۳۷۰	دمپینگ عمودی (Ns/m)



شکل ۲. مدل‌سازی پدها، تراورس و بالاست در نرم‌افزار ABAQUS

فقط روی تراورس و بین تراورس، اندازه‌گیری می‌شود. این که تراکم نقاط اولیه زیادتر می‌باشد به منظور شناسایی موج‌های کاهیده ۸ (که نرخ زوال آنها معمولاً در حدود 10 dB/m است) می‌باشد. همچنین برای نرخ زوال‌های پایین نقاطی با فواصل بیشتر مورد نیاز است.

پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در حوزه زمان در هر نقطه در نرم‌افزار MATLAB به حوزه فرکانس با فیلتر $1/3$ اکتاو انتقال داده می‌شود. به عنوان نمونه، نمودارهای شتاب عمودی به دست آمده از مدل‌سازی المان محدود بر حسب زمان و نمودار طیف تراز شتاب بر حسب فرکانس ($1/3$ اکتاو) برای فاصله $8/4$ متری از ضربه آورده شده است (شکل ۴ و ۵). باید توجه داشت که به منظور استخراج پاسخ تا باند فرکانسی ۵ کیلوهرتز، پاسخ‌ها در فاصله‌های زمانی $5-10 \times 5$ در نرم‌افزار المان محدود به روش ضمنی (implicit) در مدت زمان $0/1$ ثانیه، محاسبه شده‌اند. در ادامه برای هر باند فرکانسی نمودار پاسخ‌ها در واحد دسی بل بر حسب فاصله از تحریک رسم می‌شوند (شکل ۶).

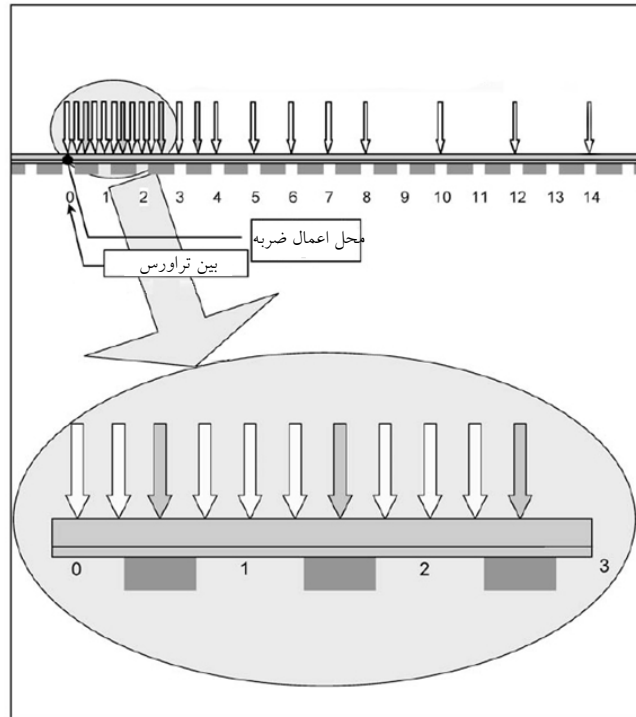
۵- اندازه‌گیری و محاسبه نرخ زوال

نرخ زوال می‌بایست از مجموعه‌ای از پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در مسافت‌های مختلف در طول ریل محاسبه شود. برای دستیابی به پاسخ ارتعاشات مورد نیاز، یک نیروی ضربه‌ای اندازه‌گیری شده بر تاج ریل اعمال می‌شود. در مدل المان محدود این ضربه به صورت نیرویی معادل 10 kN در مدت زمان 5×10^{-5} اعمال شده است. در مورد پاسخ، هم سرعت و هم شتاب می‌توانند به عنوان پاسخ در نظر گرفته شوند. با توجه به اینکه نرخ زوال عمودی در مورد ارزیابی نویز خیلی با اهمیت‌تر از نرخ زوال جانبی می‌باشد (Jones, Thompson and Diehl, 2006). در این مدل‌سازی تنها پاسخ عمودی به تحریک عمودی محاسبه شده است.

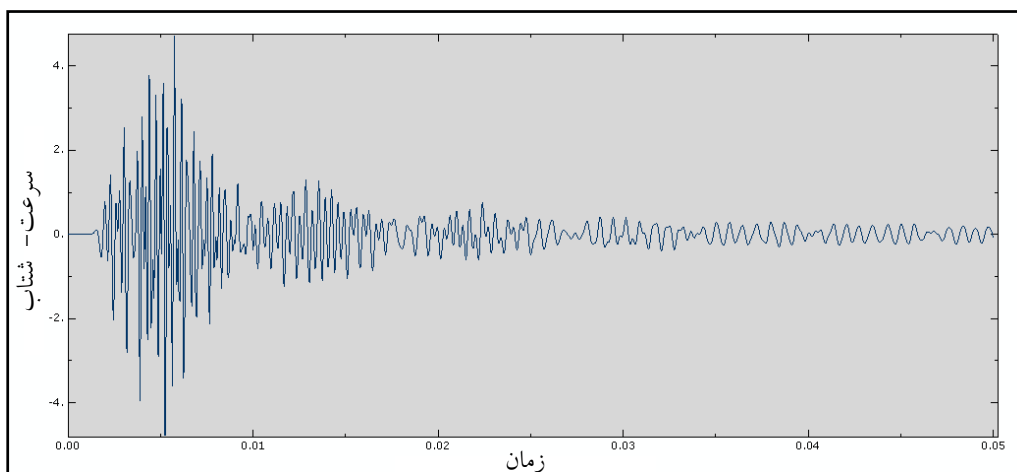
این مهم است که داده‌ها در تعداد نقاط کافی اندازه‌گیری شوند. در اینجا از طرح تقسیم‌بندی شده نقاط روی ریل به صورت شکل ۳ استفاده می‌کنیم. مطابق با شکل ۳ پاسخ تا سه تراورس در چهار نقطه در هر فاصله بین تراورس و برای تراورس‌های بعدی

فرکانسی ۸۰۰ کیلوهرتز و ۱ کیلوهرتز جایی که پاسخ در بین تراورس بیشتر از پاسخ در محل بالای تراورس می‌باشد. در ادامه، نرخ زوال برای هر باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو به‌عنوان شیب این نمودار بر حسب دسی بل بر متر تخمین زده می‌شوند. نرخ زوال به‌دست آمده از مدل‌سازی المان محدود در مقایسه با نرخ زوال حاصل از اندازه‌گیری در شکل ۷ نشان داده شده است.

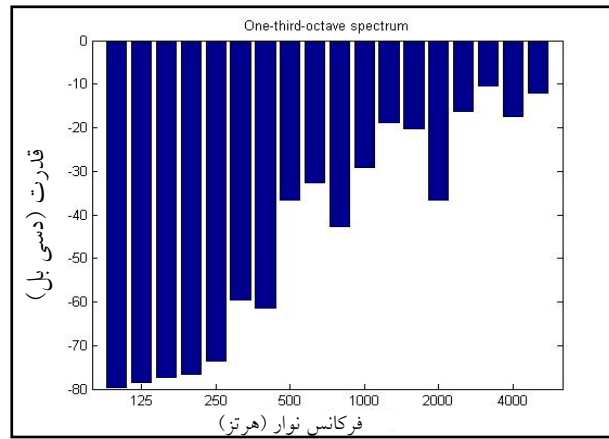
همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیرات موج‌های کاهیده^۱ در نمودارها، به‌خصوص در فرکانس‌های پایین تا فرکانس ۴۰۰ هرتز دیده می‌شود. در باندهای فرکانسی ۱۲۵۰ هرتز و ۱۶۰۰ هرتز پاسخ نسبتاً بالای موج‌های کاهیده و نرخ زوال کم امواج پیش‌رونده در مقایسه با وقتی که فقط موج‌های پیش‌رونده در نظر گرفته می‌شود، منجر به تخمین بالای نرخ زوال می‌شود. تأثیر فرکانس مود pinned-pinned به‌طور مشخص در باندهای



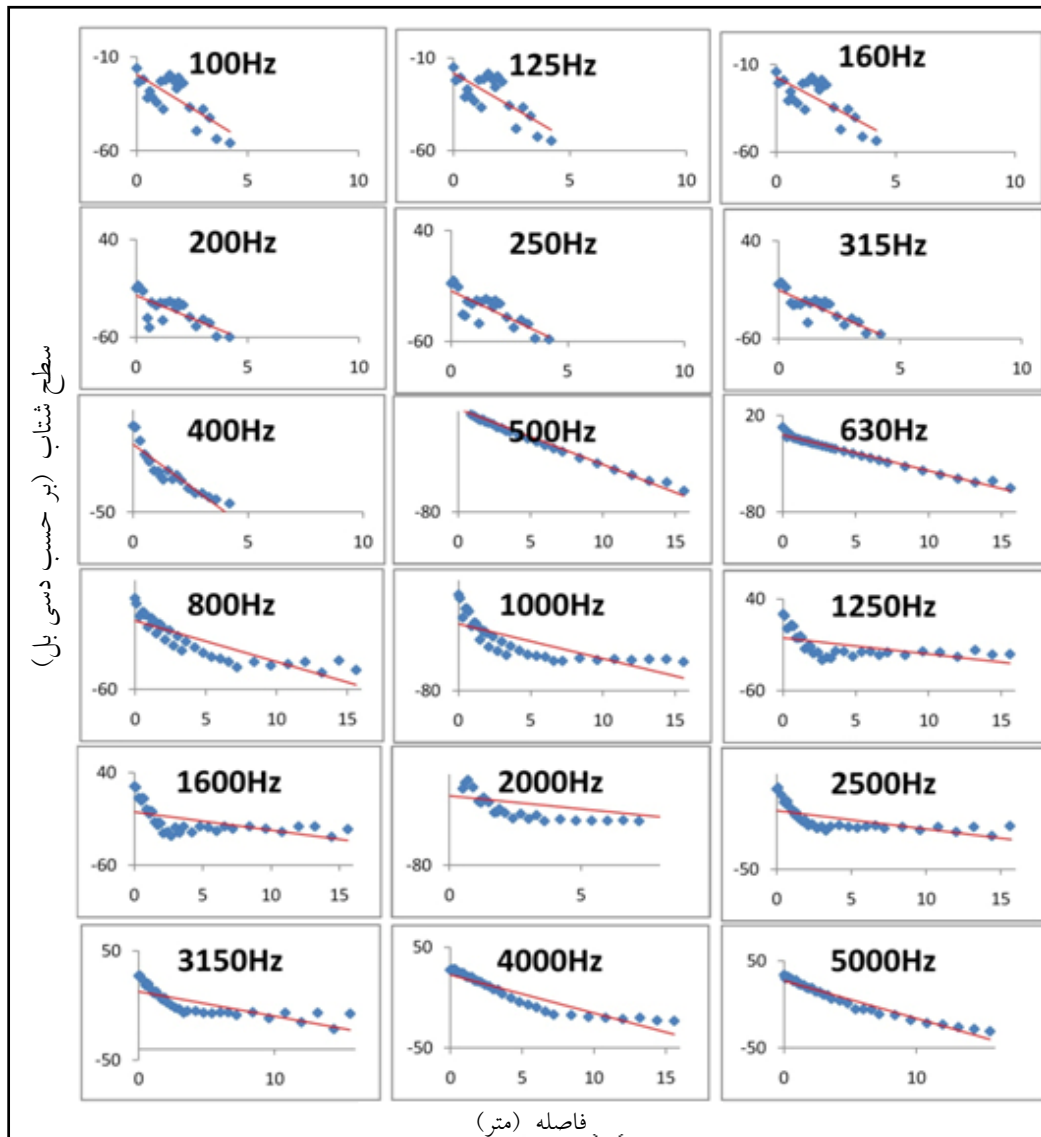
شکل ۳. محل اعمال ضربه و استخراج پاسخ‌ها (Kalivoda, 2005)



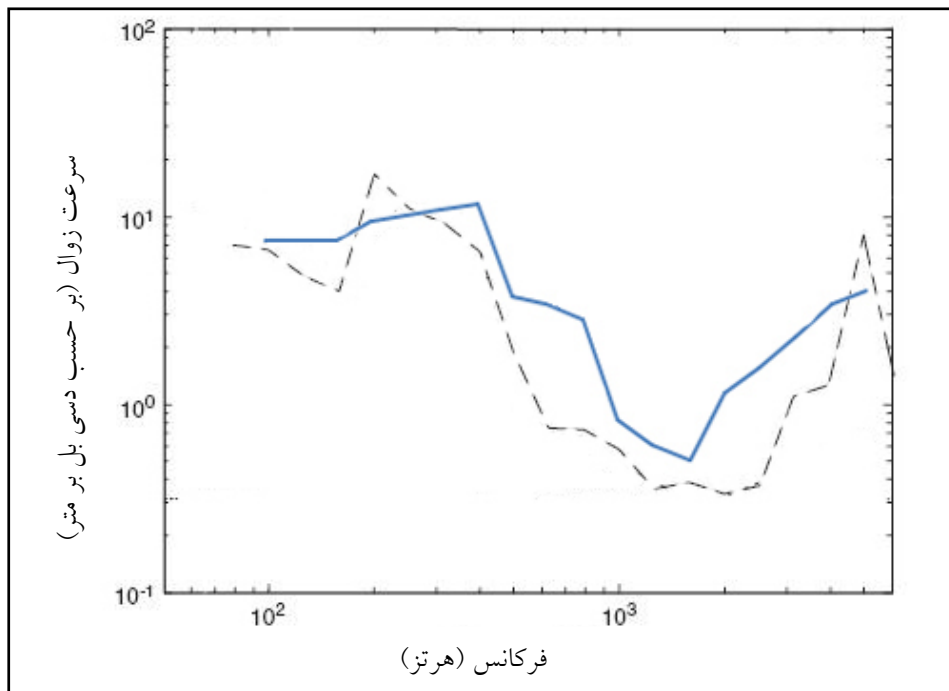
شکل ۴. پاسخ شتاب در فاصله ۱/۴ متر از ضربه



شکل ۵. طیف تراز شتاب عمودی ریل در فاصله ۸/۴ متر از ضربه در باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو



شکل ۶. تراز شتاب عمودی ریل بدون جاذب در طول ریل برای باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو (نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود ریل به طول ۱۶ متر با تکیه‌گاه‌های متناوب در نرم‌افزار ABAQUS)



شکل ۷. نرخ زوال عمودی ریل در باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو: (---)، اندازه‌گیری شده (Jones et al., 2006)، (—)، مدل المان محدود

۶- اندازه‌گیری میدانی

به منظور دستیابی به نرخ زوال خطوط مترو و مقایسه بین اندازه‌گیری شتاب عمودی ریل به تحریک ضربه عمودی، بین تراورس و روی تراورس و همچنین دستیابی به نرخ زوال خطوط بالاستی مترو، نوعی اندازه‌گیری بر خط بالاستی با تراورس بتنی یک تکه، همراه با پد، در ایستگاه متروی صادقیه انجام شده است. در این اندازه‌گیری از دیتا لاگر شرکت ژاپنی TML مدل TMR-200 و دو شتاب‌سنج تک-محوره یکی روی تاج ریل در مکان تراورس و دیگری بین تراورس استفاده شده است (شکل ۸).

به منظور اندازه‌گیری پاسخ‌ها به جای آنکه مکان شتاب‌سنج‌ها را نسبت به تحریک دور کنیم، محل تحریک تغییر داده می‌شود. به این منظور از تحریک ضربه‌ای به وسیله چکش مخصوص در طول ریل استفاده شده است. باید توجه داشت که ضربه‌های یکسانی در طول ریل ایجاد گردد، به این منظور از چکش مخصوصی که از ارتفاع معینی رها می‌شود، استفاده شده است (شکل ۸). ضربات به صورت عمودی بر تاج ریل در ۱۶ متر از ریل در فواصل مختلف از شتاب‌سنج‌ها به صورت شکل ۳ اعمال

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در فرکانس‌های پایین، شاهد نرخ زوال بالا هستیم و درست بالای فرکانس تشدید ریل روی پد، به طور تقریبی (۳۰۰ هرتز)، ریل از تراورس دی کوپله می‌شود. وقتی موج‌های پیش‌رونده شروع می‌شوند (بعد از فرکانس قطع) نرخ زوال شروع به کاهش می‌کند. در فرکانس‌های بالا حدود ۵ کیلوهرتز تأثیر مودهای تغییر شکل پای ریل که منجر به تغییر شکل بیشتر پدها شده و در نتیجه جذب انرژی نرخ زوال دوباره افزایش می‌یابد. در این مدل‌سازی، نتایج ایده‌آل نظریه نرخ زوال که به صورت نمایی می‌باشد، با وجود تکیه‌گاه‌های متناوب ریل و در نتیجه تغییرات پاسخ در روی تراورس و بین تراورس، به دست نمی‌آید.

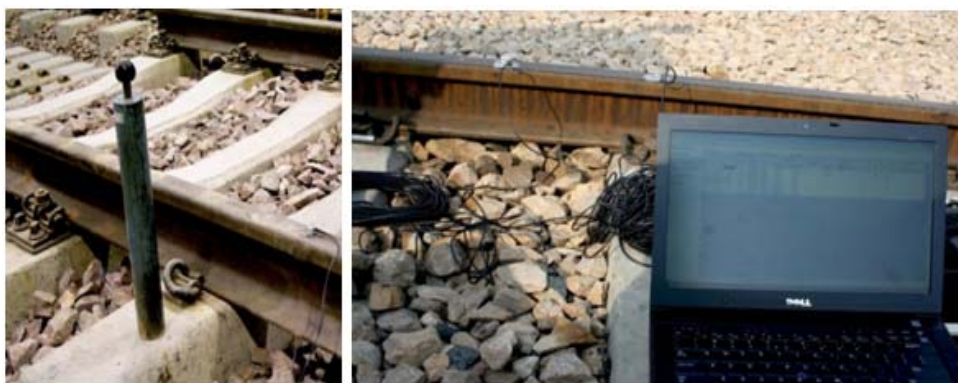
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه موج‌های بازتابیده از شرایط مرزی با وجود استفاده از المان‌های بی‌نهایت در شرایط مرزی کاملاً حذف نمی‌شود، نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود در برخی از فرکانس‌ها کاملاً منطبق بر نتایج اندازه‌گیری نمی‌باشد. با این وجود، می‌توان با نتایج نرخ زوال به دست آمده از مدل‌سازی المان محدود به بررسی انتشار نویز خطوط مختلف راه آهن پرداخت.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پاسخ‌ها در نقاط مختلف ریل تقریباً داری طیف فرکانسی یکسانی می‌باشند. پاسخ‌های مربوط به محل بین تراورس برای هر باند فرکانسی $1/3$ اکتاو در طول ریل در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در اینجا نیز تأثیر موج‌های کاهیده تا فرکانس 400 هرتز دیده می‌شود و فرکانس pinned-pinned در باند فرکانسی ۱ کیلوهرتز رخ می‌دهد، جایی که پاسخ‌های مربوط به محل تراورس‌ها به‌طور قابل توجه، کمتر از پاسخ‌های مربوط به محل بین تراورس می‌باشد.

شده و پاسخ‌ها با فرکانس نمونه‌گیری 105 به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده شدند و تراز شتاب در حوزه فرکانس در باندهای فرکانسی $1/3$ اکتاو به‌دست می‌آید و به این ترتیب نرخ زوال مانند آنچه که در بخش قبلی، در مورد پاسخ‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی المان محدود توضیح داده شد، محاسبه می‌شود.

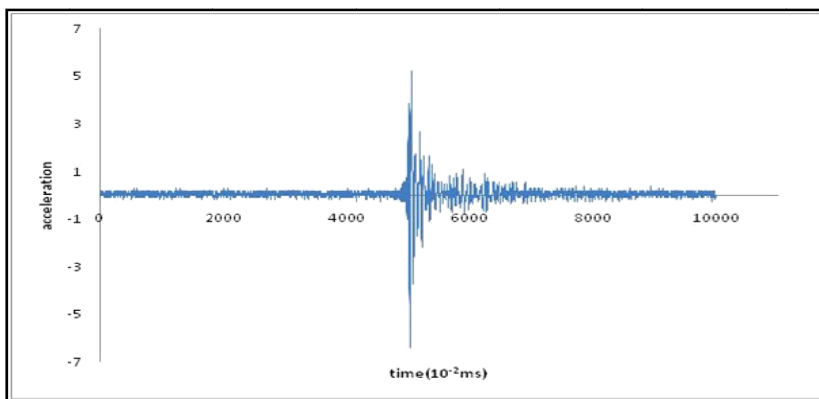
پاسخ‌های مربوط به شتاب‌سنج نصب شده بین تراورس، برای چند نقطه از ریل همراه با طیف فرکانسی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



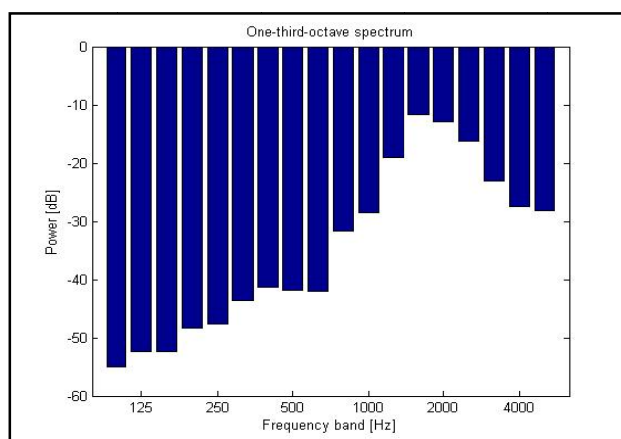
شکل ۸. محل قرار گیری شتاب‌سنج‌ها بر تاج ریل و چکش به‌کار گرفته شده برای تولید ضربه‌های یکسان



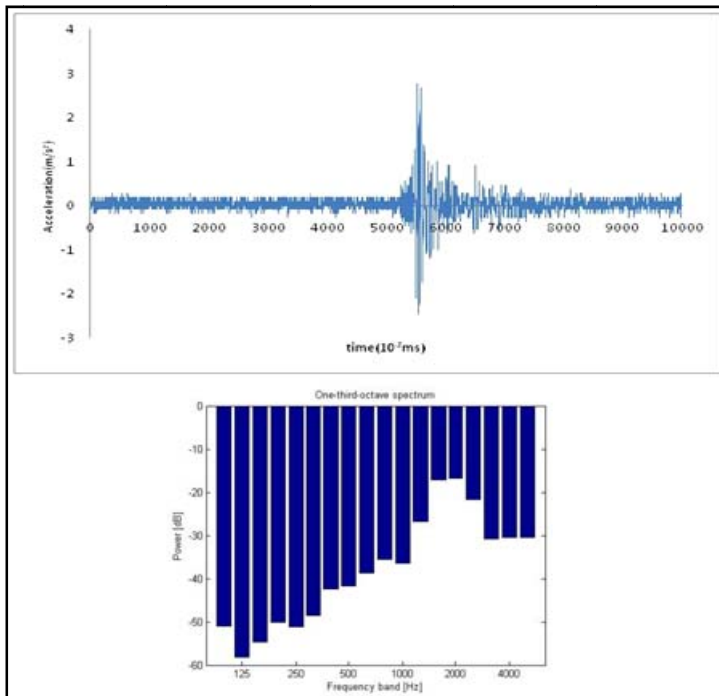
شکل ۹. اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی ریل در خطوط متروی صادقیه



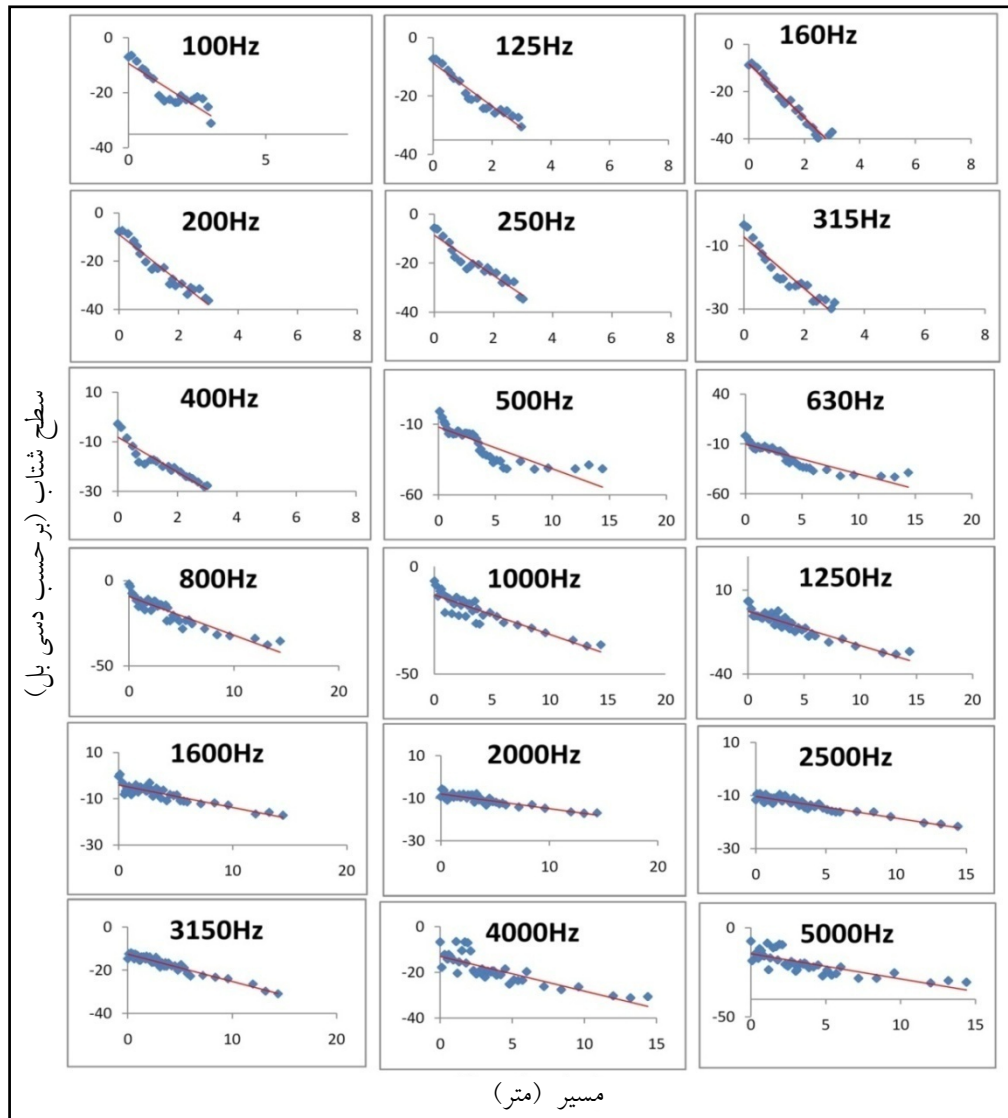
شکل ۱۰. پاسخ شتاب عمودی ریل در فاصله ۸/۴ متری از ضربه (حاصل از تست میدانی خط متروی صادقیه)



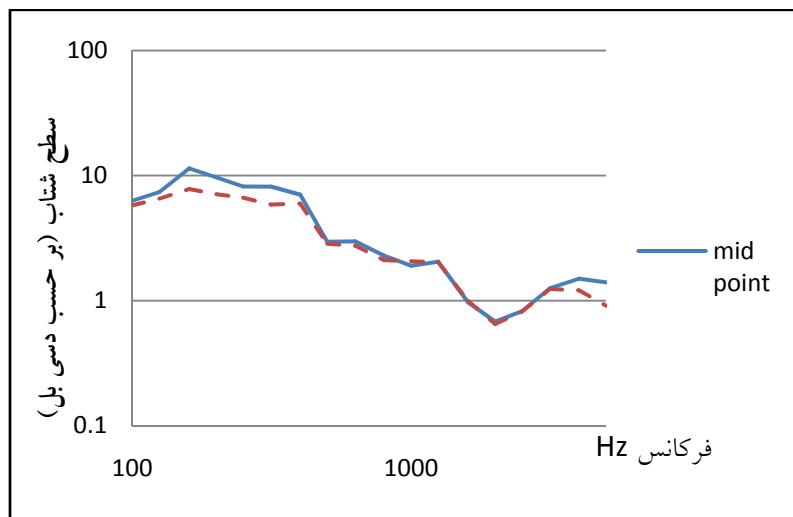
شکل ۱۱. طیف تراز شتاب عمودی ریل در فاصله ۸/۴ متری از ضربه در باندهای فرکانسی ۱/۳ اکتاو (تست میدانی)



شکل ۱۲. پاسخ شتاب عمودی ریل در فاصله ۱۴/۴ متری از ضربه (شکل بالا) همراه با طیف فرکانسی (شکل پایین) (حاصل از تست میدانی خط متروی صادقیه)



شکل ۱۳. تراز شتاب عمودی ریل، اندازه‌گیری شده (خطوط متروی صادقیه) در محل بین تراورس در طول ریل برای باند فرکانس ۱/۳ اکتاو



شکل ۱۴. نرخ زوال اندازه‌گیری شده عمودی ریل در خطوط متروی صادقیه: در محل بین تراورس (—) و در محل تراورس (---)

داده شد. بنابراین، می‌توان با نتایج نرخ زوال حاصل از مدل‌سازی المان محدود به بررسی انتشار نویز خطوط مختلف راه آهن پرداخت.

در ادامه نتایج اندازه‌گیری میدانی روی خط خطوط متروی صادقیه برای دستیابی به نرخ زوال عمودی خط مورد توجه قرار گرفته است. اندازه‌گیری توسط دو شتاب‌سنج، یکی روی محل تراورس و دیگری در محل بین تراورس‌ها انجام شده است. نتایج نرخ زوال این دو شتاب‌سنج با یکدیگر مقایسه شده و نشان داده شده است که در فرکانس‌های پایین فرکانس قطع، نرخ زوال مربوط به شتاب‌سنج در محل تراورس، از نرخ زوال مربوط به شتاب‌سنج در محل بین تراورس‌ها، تقریباً ۲ دسی بل کمتر می‌باشد ولی در فرکانس‌های بالای فرکانس قطع نتایج مربوط به دو شتاب‌سنج تقریباً منطبق بر یکدیگر می‌باشند. نشان داده شد که موج‌های کاهیده تا فرکانس ۴۰۰ کیلوهرتز در پاسخ‌های مربوط به محل بین تراورس‌ها وجود دارند و همچنین فرکانس *pinned-pinned* در باند فرکانسی ۱ کیلوهرتز رخ می‌دهد.

نرخ زوال‌های اندازه‌گیری شده یکی در محل تراورس و دیگری بین تراورس در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ زوال بعد از فرکانس قطع که فرکانس تشدید ریل روی تراورس می‌شود، (حدود ۴۰۰ هرتز) شروع به کاهش می‌کند و در فرکانس ۲ کیلوهرتز به کمترین مقدار خود می‌رسد. با مقایسه نتایج مربوط به شتاب‌سنج در محل تراورس و شتاب‌سنج در محل بین تراورس مقدار نرخ زوال در فرکانس‌های پایین، پایین تر از فرکانس قطع، با هم تفاوت داشته و نرخ زوال اندازه‌گیری شده ریل در بین تراورس نرخ زوال بیشتری را نشان می‌دهد.

بنابراین، در آن محدوده فرکانسی که از لحاظ نویز ریل قابل توجه است، تفاوتی بین این دو مکان اندازه‌گیری نمی‌باشد. با این وجود، اندازه‌گیری‌ها در محل بین تراورس، می‌توانند تأثیر مود *pinned-pinned* را که در آن، پاسخ در مکان تراورس در مقایسه با پاسخ در بین تراورس بسیار کمتر می‌باشد، در نمودارهای مربوط به تراز شتاب در طول ریل، نشان دهند.

۸- پی‌نوشت‌ها

1. Rolling Noise
2. Curve Squeal Noise
3. Impact Noise
4. European Rail Research Institute
5. Track & Wheel Interaction Noise Software
6. Decay Rate
7. Boundary Element
8. Near Field Waves
9. Foot Flapping

۹- مراجع

- Brown G.P., Byrne K.P., (2005) "Determining the response of infinite, one-dimensional, non-uniform periodic structures by substructuring using wave shape coordinates", *Journal of Sound and Vibration* 287, pp. 505-523.
- Griefahn B., Marks A., Robens S., (2006) "Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep", *Journal of Sound and Vibration* 295, pp. 129-140.
- Heckl M., (2002) "Coupled waves on a periodically supported Timoshenko beam", *Journal of Sound and vibration* (2002) 252(5), pp. 849-882.

۷- نتیجه‌گیری

در حمل و نقل ریلی و در محدوده سرعت‌های معمول (تا ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت)، ریل یکی از منابع غالب تولید کننده نویز می‌باشد. در این مقاله نرخ زوال ارتعاشات ریل معرفی و ارتباط بین نرخ زوال ارتعاشات و انتشار نویز ارائه شده است. در روش تجربی، برای اندازه‌گیری نرخ زوال ارتعاشات ریل، ریل توسط چکش تحریک شده و شتاب عمودی ارتعاشات ریل در فواصل مختلف اندازه‌گیری می‌شود. از نتایج اندازه‌گیری شده با فرکانس نمونه‌گیری حدود ۱۰۰ کیلوهرتز نرخ زوال ارتعاشات محاسبه می‌شود. در مدل‌سازی کامپیوتری، به‌منظور دستیابی به نرخ زوال ارتعاشات ریل، روش اندازه‌گیری تجربی پیاده‌سازی شده است. در ابتدا ریل با تکیه‌گاه‌های متناوب در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و پاسخ‌های شتاب نقاط مختلف در طول ریل نسبت به تحریک ضربه به‌دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی به نرم‌افزار MATLAB انتقال داده شده و تراز پاسخ‌ها در حوزه فرکانس به‌دست آمده است. پس از آن نرخ زوال در هر باند فرکانسی، ۱/۳ اکتاو برای ریل محاسبه شده و با نرخ زوال حاصل از اندازه‌گیری محققان مقایسه شده و مطابقت خوبی نشان

- Moser F., Jacobs, L. J, Qu J., (1999) "Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method", NDT&E International 32, pp. 225-234.
- Maes J., Sol H., (2003) "A double tuned rail damper—increased damping at the two first pinned-pinned frequencies", Journal of Sound and Vibration 267, pp. 721-737.
- Remington P.J., (1987) "Wheel/Rail Rolling Noise I: Theoretical analysis", Journal of acoustical society of America 81, pp. 1805-1823.
- Thompson D.J, (2009) "Railway Noise and Vibration", Elsevier Ltd.
- Jones C.J., Thompson D.J, Diehl R.J., (2006) "The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation", Journal of Sound and Vibration 293 pp. 485-495.
- Kabo, E., Nnielsen J. C. O. and Ekberg A., (2006) "Prediction of dynamic train-track interaction and subsequent material deterioration in the presence of insulated rail joints", Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement, pp. 718-729.
- Kalivoda M.T., (2005) "Track decay rate of different railway noise test sites", Conference Forum Acousticum, Budapest.

Vibration Decay Rate Analysis and Test on Ballasted Railway Track

H. Molatefi, Assistant Professor, Department of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

S. Izadbakhsh, M.Sc. Grad., Department of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: molatefi@iust.ac.ir

ABSTRACT

In the railway transportation industry, the rail is considered to be the dominant source of rolling noise over the usual speed range (<160km/h). It has been well documented that the rate of decay of vibration along the rail is closely linked to the noise performance of the track. In this study, a finite element model of a periodic supported rail is developed in ABAQUS to study the acoustic performance of the rail. To compute the decay rates, acceleration responses along the rail are converted into the frequency domain and then the decay rates are obtained for each 1/3 octave band by processing the response levels. It is shown that the decay rate results obtained by FEM follow the same trend as the measured decay rate. Therefore the FEM decay rate can be used for generating comparisons between different tracks as an indicator of their acoustic performance. To test the vertical decay rate on a real track, a rail section at the Sadeghieh subway site is also tested and analyzed. To this end, the vertical responses of the rail are measured by two accelerometers. It is shown that at low frequencies (below the cut-on frequency), the decay rate resulting from the accelerometer on the sleeper place is 2dB less than the decay rate result from the accelerometer on the mid -point. However at high frequencies (above cut-on frequency), the decay rate results from both accelerometers correspond closely to each other.

Keywords: Rolling Noise, Decay Rate, Finite Element, Cut-on Frequency