

بررسی تأثیر استفاده از آسفالت به عنوان لایه‌ی جاذب ارتعاش در خط راه‌آهن

مرتضی اسماعیلی (استادیار)

محمد فشارکی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران: شریف
دوری: ۲-۲۷، شماره‌ی ۲، ص. ۱۰۶-۱۰۱، (پادداشت نشانی)

یکی از مهم‌ترین مشکلات راه‌آهن‌های درون‌شهری و خطوط سریع‌السیر، کنترل ارتعاشات ناشی از عبور قطارهاست. این ارتعاشات ضمن آسیب‌رساندن به زیرساخت‌های خط ریلی، باعث عدم آسایش ساکنین اطراف خط نیز می‌شود. یکی از راهکارهای کاهش ارتعاش، استفاده از بتن آسفالتی -- به‌ویژه بتن آسفالتی اصلاح‌شده با لاستیک -- در زیرسازی خطوط ریلی است. در این نوشتار به‌طور ویژه اثرات استفاده از آسفالت گرم (HMA)^۱ و بتن آسفالتی اصلاح‌شده با لاستیک (RMAC)^۲ بر کاهش ارتعاش در خطوط ریلی سریع‌السیر به‌روش عددی اجزاء محدود و به‌کمک نرم‌افزار PLAXIS مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی دامنه و سرعت بارگذاری و ضخامت لایه‌ی آسفالت نشان‌دهنده‌ی قابلیت بالای RMAC، در مقایسه با سایر مصالح، برای کاهش ارتعاشات موجود است.

واژگان کلیدی: آسفالت اصلاح‌شده با لاستیک، ارتعاش، میرایی، شتاب حداکثر، میانگین مجذور مربعات.

m_esmaeili@iust.ac.ir
m_fesharaki@rail.iust.ac.ir

۱. مقدمه

همچنین آسفالت زیرلایه، توسط بالاست در برابر عوامل جوی محافظت می‌شود در نتیجه عمر روسازی آسفالتی راه‌آهن به‌مراتب بیشتر از روسازی راه است.^[۱] استفاده از آسفالت، به‌خصوص آسفالت اصلاح‌شده با لاستیک (RMAC)، موجب کاهش ارتعاش در خط می‌شود. تجارب استفاده از این نوع آسفالت در روسازی بزرگراه‌ها نشان‌دهنده‌ی افزایش کیفیت و عمر روسازی است. مزیت دیگر آسفالت اصلاح‌شده با لاستیک (RMAC) استفاده از لاستیک‌های فرسوده‌ی اتومبیل‌ها در ساخت آن (جایگزینی بخشی از سنگدانه‌های آسفالت با لاستیک) است. با این روش پسماندهای یادشده به‌طور مناسبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.^[۲] در نوشتار حاضر با تکیه بر میرایی قابل توجه و مقاومت برشی قابل قبول بتن آسفالتی اصلاح‌شده با لاستیک، عملکرد این مصالح در کاهش ارتعاشات ناشی از عبور وسیله‌ی نقلیه‌ی ریلی در خطوط سریع‌السیر مورد بررسی قرار گرفته، و میزان کارایی آنها با خطوط متشکل از بتن آسفالتی معمولی و خطوط بالاستی مقایسه شده است. در حال حاضر برای کاهش ارتعاش در خطوط ریلی، از روش‌های مختلفی مانند پدهای زیر تراورس^۵، زیراندازهای بالاست^۶ و یا به‌کارگیری از لایه‌های پلی‌اورتان (PU) و همچنین پدها و پابندهای با قابلیت ارتجاعی بالا استفاده می‌شود.^[۳] بسیاری از روش‌های موجود موجد هزینه‌های بسیار زیاد در ساخت هستند، یا به‌علت وجود سختی کم نیازمند دوره‌های تعمیر و نگهداری منظم‌اند. به‌علت سختی و میرایی بالا، استفاده از بتن آسفالتی اصلاح‌شده با لاستیک (RMAC) بسیاری از مشکلات موجود در راهکارهای کنترل ارتعاشات در خط ریلی را به‌طور قابل ملاحظه‌ی کاهش

افزایش تقاضای بار محوری و میزان مسافر در سال‌های اخیر، استفاده از رویکردهای جدید در طراحی خطوط ریلی را ضروری می‌سازد. حجم بالای عملیات نگهداری، زمان قابل ملاحظه‌ی مسدودی و کیفیت پایین هندسه‌ی خط، در خطوط راه‌آهن بالاستی، امکان رقابت این نوع خطوط را با سایر گزینه‌های حمل‌ونقل محدود کرده است. با پیدایش قطارهای سریع‌السیر نیاز به خطوط با کم‌ترین میزان نگهداری و کم‌ترین زمان مسدودی بیش از پیش احساس می‌شود. جوابگویی به این نیاز منجر به توسعه‌ی خطوط با دال بتنی شده است. به‌کارگیری سیستم دال بتنی، جوابگویی الزامات فنی و هندسی خط است اما هزینه‌ی بسیار بالای ساخت، توسعه‌ی آن را با مشکلاتی مواجه کرده است. در این میان به‌موافقت استفاده از سیستم دال خط، توسعه‌ی خطوط آسفالتی قادر به حل بسیاری از مشکلات فوق بوده است. با به‌کارگیری آسفالت به‌عنوان زیرلایه^۲ در خط ریلی، علاوه بر استفاده از مزایای وجود بالاست -- از جمله سهولت تعمیر و نگهداری -- میزان تغییر شکل خط کاهش می‌یابد و آلودگی بالاست^۴ نیز کم می‌شود، بدون آن که هزینه‌های قابل توجه خطوط با دال بتنی بر خط تحمیل شود. علاوه بر آن خطوط با دال بتنی باعث افزایش صدا و ارتعاش ناشی از عبور قطار می‌شوند که کاهش آثار آن نیازمند صرف هزینه‌هایی علاوه بر هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت این خطوط است.

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱۱/۲۸، اصلاحیه ۱۳۸۸/۹/۱۰، پذیرش ۱۳۸۸/۱۲/۱۱

می‌دهد. در ادامه با انجام تحلیل حساسیت، درخصوص میزان بار عبوری، فرکانس بار و ضخامت لایه‌ی آسفالتی، عملکرد مناسب این نوع آسفالت در کاهش ارتفاعات خط نشان داده شده است.

۲. خصوصیات بتن آسفالتی اصلاح شده با لاستیک (RMAC)

مطالعات انجام شده برای ارزیابی تأثیر آسفالت، به خصوص آسفالت اصلاح شده با لاستیک، بر کاهش ارتفاعات خط ریلی تاکنون در قالب مطالعات آزمایشگاهی و نیز به‌کارگیری روش‌های عددی انجام گرفته است. براساس آزمایش‌های سانتریفوژ^۷ انجام شده برای ارزیابی تأثیر مصالح مختلف بر بستر خطوط سریع‌السیر، استفاده از RMAC در زیرسازی خطوط ریلی تأثیر قابل ملاحظه‌ی در کاهش ارتفاعات خط داشته است. عملکرد بسیار مناسب آن همچنین در کاهش ارتفاعات، در به‌کارگیری همزمان با پلی‌استیروول منبسط (EPS)^۸ مورد تأیید قرار گرفته است.

برای بررسی تأثیر RMAC بر کاهش ارتفاعات، دو آزمایش کوچک مقیاس تحت شرایط عادی جاذبه انجام شده است. این آزمایش شامل پرتاب وزنه‌ی از یک ارتفاع مشخص بر روی دو نمونه مصالح است. در نمونه‌ی اول از بستر متراکم ماسه‌ی و در نمونه‌ی دوم از همان ماسه‌ی متراکم ولی با لایه‌ی نازک از RMAC استفاده شده است. سایر پارامترها (مانند وزن و ارتفاع پرتاب وزنه‌ها) ثابت نگه داشته شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که لایه‌ی RMAC تا بیش از ۵۰٪ در کاهش دامنه و مدت ارتعاش مؤثر است. آزمایشات مشابهی با وزن و ارتفاع پرتاب متفاوت انجام شده است. در تمامی این آزمایشات مدت و دامنه‌ی ارتعاش تا حدود ۵۰٪ کاهش یافته است.^[۵]

دسته‌ی دیگری از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده به منظور بررسی خواص RMAC در راه‌آهن، نشان می‌دهد که مدول برشی آسفالت اصلاح شده بیش از بتن آسفالتی معمولی است و با افزایش درصد لاستیک افزایش می‌یابد. همچنین براساس نتایج به دست آمده، آسفالت‌های اصلاح شده در دماهای 10°C ، 0°C و 22°C مدول برشی تقریباً ثابتی دارند در حالی که در بتن آسفالتی معمولی، مدول برشی در دمای 10°C ، 0°C کم‌تر از دمای 22°C و 30°C است. همچنین با افزایش کرنش برشی نرخ کاهش مدول برشی در بتن آسفالتی بیشتر از بتن آسفالتی اصلاح شده است؛ در نتیجه تمایل آسفالت اصلاح شده برای حفظ سختی در محدوده‌ی وسیعی از کرنش برشی بیشتر از آسفالت معمولی بوده و در مجموع عمر آن نسبت به آسفالت معمولی بیشتر است.^[۶]

۳. مطالعه‌ی عددی اثر RMAC بر کاهش ارتفاعات خط ریلی

در این بخش اثر استفاده از RMAC به عنوان زیرسازی خط ریلی در مقایسه با خطوط آسفالت گرم (HMA) و خطوط بالاستی سنتی در کاهش ارتفاعات ناشی از عبور قطار توسط نرم‌افزار اجزاء محدود^۹ PLAXIS که قادر به تحلیل دینامیکی محیط‌های خاکی است، مورد بررسی قرار گرفته است. صحت نسخه‌ی مورد استفاده‌ی نرم‌افزار، با حل مثال‌های نمونه و مقایسه‌ی آن با نتایج نظری به

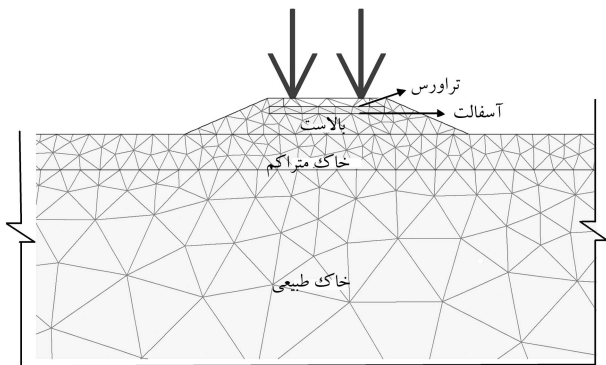
اثبات رسیده است. در ادامه، جزئیات روند مدل‌سازی اعم از هندسه، المان‌بندی و شرایط مرزی مدل، مشخصات مکانیکی مصالح، بارگذاری اعمالی به مدل به همراه فرضیات مورد استفاده و همچنین نتایج به دست آمده از تحلیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۳. هندسه و شرایط مرزی مدل

برای انجام تحلیل پویا خط ریلی به صورت کرنش مسطح و در شرایط دو بعدی (۲D) مدل شده است. مدل‌سازی‌های در سه حالت مختلف برای شرایط خط بالاستی، خط بالاستی دارای لایه‌ی آسفالت، و خط بالاستی دارای بتن آسفالتی اصلاح شده با لاستیک صورت گرفته است. در حالت خط بالاستی، هندسه‌ی مدل در بخش روسازی شامل لایه‌های تراورس و بالاست و در بخش زیرسازی مشتمل بر ترکیبی از یک لایه خاک متراکم و بستر طبیعی در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی تراورس و بالاست براساس پیشنهادات ارائه شده در نشریه‌ی ۳۰۱ انتخاب شده است.^[۷] در خصوص زیرسازی ضخامت لایه‌ی خاک متراکم برابر با ۱ متر و بستر طبیعی برابر با 10° متر در نظر گرفته شده است. در حالتی که مدل‌سازی برای روسازی شامل آسفالت و RMAC صورت گرفته، ضخامت این مصالح برای دست‌یابی به ضخامت بهینه تغییر داده شده و روی این موضوع تحلیل حساسیت صورت گرفته است. در تمامی حالات، ابعاد هندسی مدل در جهت عرضی برای اطمینان از میراشدن امواج سطحی برابر با 90° متر در نظر گرفته شده است؛ همچنین برای اطمینان کامل از زوال امواج رایله، برشی و فشاری در مرزهای قائم و افقی مدل، در این نقاط از مرزهای جاذب انرژی^{۱۰} استفاده شده است. در روند تقسیم‌بندی محیط به اجزاء، از المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی به منظور بالابردن دقت تحلیل استفاده شده است. شکل ۱ هندسه‌ی مدل مورد مطالعه و جزئیات آن را نشان می‌دهد.

۲.۳. مشخصات مصالح مورد استفاده در تحلیل عددی

در مدل‌سازی‌های صورت گرفته برای خطوط بالاستی، بالاستی دارای لایه‌ی آسفالت و بالاستی دارای لایه‌ی RMAC، مدل‌های رفتاری مورد استفاده و مشخصات مکانیکی مصالح به شرح مندرج در جدول ۱ ارائه شده است. و بتن آسفالتی، کشسان خطی و با نسبت میرایی ویسکوز^{۱۱} ۱۲٪، ۴٪، ۱٪ در نظر گرفته شده است. برای مصالح بستر شامل بالاست، خاک متراکم و خاک طبیعی، از مدل رفتاری کشسانی-خمیری با معیار خمیری موهر-کولمب در روند تحلیل استفاده شده و در عین حال نسبت میرایی خاک برابر ۲٪ منظور شده است. لازم به ذکر است



شکل ۱. هندسه‌ی مدل استفاده شده در برنامه‌ی PLAXIS.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی. [۸، ۲۰۱]

مصالح	مدل رفتاری	چگالی ($\frac{Kg}{m^3}$)	نسبت پواسون	مدول کشسانی (Pa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (Pa)	زاویه اتساع (درجه)	ضریب α در میرایی رایله
تراورس	کشسان	۲۴۸۰	۰٫۳	$۲٫۶۷ \times ۱۰^{۱۰}$	-	-	-	۱
RMAC	کشسان	۲۳۷۸	۰٫۳	$۲٫۸۶ \times ۱۰^۹$	-	-	-	۲۵
آسفالت	کشسان	۲۳۷۸	۰٫۳	$۲٫۰۸ \times ۱۰^۹$	-	-	-	۸
بالاست	موهرکولمب	۲۰۹۲	۰٫۳	۲×۱۰^۷	۳۱	۱۰۰۰	۲۲٫۵	۰٫۱۲۵
خاک متراکم	موهرکولمب	۲۰۹۲	۰٫۳	۲×۱۰^۷	۳۰	۱۰۰۰	۲۱٫۸	۰٫۱۲۵
خاک طبیعی	موهرکولمب	۱۸۹۰	۰٫۳	$۱٫۳ \times ۱۰^۷$	۳۱	۱۰۰۰	۲۲٫۵	۰٫۱۲۵

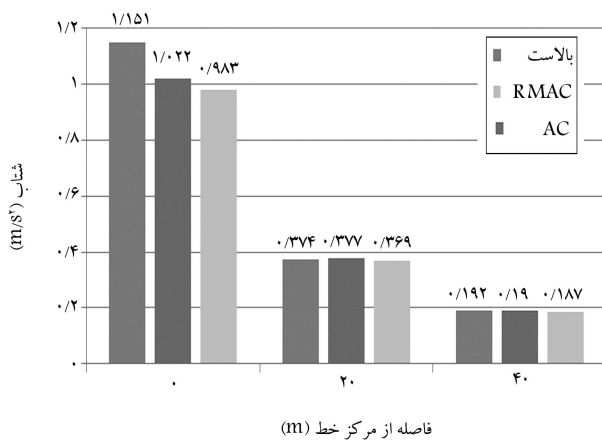
محل اعمال بار) و نقطه‌ی C (در فاصله‌ی ۴۰ متری از بارگذاری) مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل حساسیت، پارامترهایی مانند دامنه‌ی بار، ضخامت آسفالت و فرکانس بار تغییر داده شده و نتایج آن در بخش‌های مختلف ارائه شده است.

۱.۴.۳. تأثیر مصالح مختلف در کاهش ارتعاش

برای بررسی تأثیر مصالح مختلف در کاهش ارتعاش، سه ماده‌ی مختلف بتن آسفالتی اصلاح شده لاستیکی، بتن آسفالتی و بالاست مورد استفاده قرار گرفته است (ضخامت AC و RMAC، ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است). شکل ۲ میزان شتاب بیشینه را برای سه ماده‌ی مختلف بستر نشان می‌دهد. در هر سه نقطه‌ی A، B و C بتن آسفالتی اصلاح شده با لاستیک کم‌ترین میزان ارتعاش را نشان می‌دهد به طوری که کاهش میزان ارتعاش در نقطه‌ی A که در زیر خط واقع است از بقیه‌ی نقاط بیشتر است. جدول ۲ مجذور میانگین مربعات شتاب و شتاب بیشینه را در نقاط A، B و C برای مصالح مختلف و نرخ کاهش آن برای RMAC، AC را در مقایسه با بالاست نشان می‌دهد. چنان که مشخص است، RMAC بیشترین تأثیر را در کاهش ارتعاش داشته و میزان شتاب بیشینه‌ی خط را تا ۱۵٪ کاهش داده است. برای بتن آسفالتی میزان کاهش شتاب بسیار کم‌تر است.

۲.۴.۳. تأثیر اندازه بار اعمالی

برای بررسی تأثیر اندازه بار، فرکانس اعمال بار برابر با ۲ هرتز ثابت نگه داشته شده است. براساس اندازه‌گیری‌های صحرائی انجام شده، فرکانس عبوری اصلی بوی از



شکل ۲. مقایسه‌ی شتاب بیشینه با مصالح مختلف بستر.

که با توجه به حاکم بودن کرنش‌های نسبتاً کوچک بر روند تحلیل مسئله، مقادیر میرایی مفروض منطقی به نظر می‌رسند. در ادامه، با داشتن فرکانس طبیعی مدل در شرایط ارتعاش آزاد از مقادیر میرایی یاد شده به همراه فرکانس طبیعی برای محاسبه‌ی ضرایب میرایی رایله (α, β) استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای استخراج پارامترهای مکانیکی مصالح در تحلیل حاضر، مراجع متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. [۸، ۲۰۱]

۳.۳. بارگذاری

بارگذاری ناشی از عبور قطار سریع‌السیر، در شرایط ایده‌آل هارمونیک فرض شده و براساس پیشنهاد دریافت شده در سال ۲۰۰۴ به صورت رابطه‌ی ۱ در نظر گرفته شده است. [۸]

$$F = P(1 - \cos 2\pi ft) \quad (1)$$

که در آن P دامنه، f فرکانس بار، t پارامتر زمان است. P در این رابطه برابر بار چرخ سهم یک تراورس، مساوی با ۲۵٪ بار محور عبوری در نظر گرفته می‌شود. فرکانس بار، مطابق تحقیقات میدانی صورت گرفته [۸-۱۰] برابر با فرکانس عبور بوی از به عنوان فرکانس غالب بارگذاری قطار، در نظر گرفته شده است.

۴.۳. تحلیل حساسیت و ارائه‌ی نتایج تحلیل پویا

برای ارزیابی میرایی ارتعاش، دو پارامتر «شتاب بیشینه^۲» و «مجذور میانگین مربعات شتاب^۳» در نقاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مجذور میانگین مربعات شتاب از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2)$$

که در آن $a(t)$ نماد شتاب در زمان t و T مدت ارتعاش است. مجذور میانگین مربعات یک روش معمول ریاضی برای تعیین دامنه‌ی مؤثر است. برای یک موج یکپوخت سینوسی، مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات ۰٫۷۰۷ مقدار بیشینه یا ۰٫۳۵۴ مقدار اوج-اوج^{۱۴} است.

با مقایسه‌ی ریشه‌ی میانگین مربعات نقاط مختلف می‌توان ظرفیت آسفالت را در میرایی ارتعاش تعیین کرد. به منظور تعیین میزان ارتعاشات ناشی از خط ریلی، شتاب در سه نقطه‌ی A (مستقیماً زیر بار)، نقطه‌ی B (در فاصله‌ی ۲۰ متری از

جدول ۲. تأثیر استفاده از مصالح مختلف در شتاب بستر (اعداد مثبت نشانگر کاهش دامنه و اعداد منفی نشانگر افزایش دامنه است).

نقطه	فاصله تا محل اعمال (m)	نوع بستر	A_{RMS} ($\frac{m}{g}$)	کاهش در A_{RMS}	A_{peak}	کاهش در A_{peak}
A	۰	بالاست	۰٫۴۰۱	*	۱٫۱۵۱	*
		بتن آسفالتی	۰٫۳۶۶	۹	۱٫۰۲۲	۱۱
		RMAC	۰٫۳۵۸	۱۱	۰٫۹۸۳	۱۵
B	۲۰	بالاست	۰٫۱۹۱	*	۰٫۳۷۴	*
		بتن آسفالتی	۰٫۱۸۵	۳٫۱	۰٫۳۷۷	-۰٫۰۹
		RMAC	۰٫۱۸۳	۴٫۲	۰٫۳۶۹	۱٫۴
C	۴۰	بالاست	۰٫۰۶۴	*	۰٫۱۹۲	*
		بتن آسفالتی	۰٫۰۶۳	۱٫۶	۰٫۱۹۰	۰٫۰۱
		RMAC	۰٫۰۶۳	۱٫۶	۰٫۱۸۷	۰٫۰۳

* شتاب در خط بالاست مبنای مقایسه در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. تأثیر اندازه‌ی دامنه‌ی بار بر شتاب.

نقطه	فاصله تا محل اعمال بار (متر)	دامنه بار (KN)	A_{RMS}	A_{peak}
A	۰	۵۰	۰٫۲۳۷	۰٫۶۳۶
		۷۵	۰٫۳۵۸	۰٫۹۸۳
		۱۰۰	۰٫۵۱۵	۱٫۴۴۰
B	۲۰	۵۰	۰٫۱۲۲	۰٫۲۴۱
		۷۵	۰٫۱۸۳	۰٫۳۶۹
		۱۰۰	۰٫۲۴۴	۰٫۴۸۴
C	۴۰	۵۰	۰٫۰۴۱	۰٫۱۲۰
		۷۵	۰٫۰۶۳	۰٫۱۸۷
		۱۰۰	۰٫۰۸۲	۰٫۲۴۴

جدول ۴. تأثیر تغییر فرکانس اعمال بار بر شتاب.

نقطه	فاصله تا محل اعمال بار (متر)	فرکانس بار	A_{RMS}	A_{peak}
A	۰	۱	۰٫۱۲۲	۰٫۳۰۸
		۲	۰٫۳۵۸	۰٫۹۳۸
		۵	۰٫۱۲۷	۳٫۴۲۰
		۱۰	۰٫۰۴۰	۸٫۷۹۰
B	۲۰	۱	۰٫۰۳۹	۰٫۰۸۰
		۲	۰٫۱۸۳	۰٫۳۶۹
		۵	۰٫۱۱۹	۰٫۳۹۹
		۱۰	۰٫۰۳۷	۰٫۲۰۸
C	۴۰	۱	۰٫۰۲۵	۰٫۰۵۹
		۲	۰٫۰۶۳	۰٫۱۸۷
		۵	۰٫۰۶۱	۰٫۳۰۴
		۱۰	۰٫۰۲۲	۰٫۱۲۵

در این بخش اعمال بار در فرکانس‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز مورد بررسی قرار گرفته و میزان بار اعمالی برابر ۷۵ کیلو نیوتن ثابت نگه داشته شده است. ریشه‌ی میانگین مربعات شتاب و شتاب بیشینه در نقاط A، B و C تحت فرکانس‌های مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، ارتعاش خط (در نقطه‌ی A) با افزایش فرکانس به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در نقاط B و C بیشترین ارتعاش در فرکانس ۵ HZ ایجاد می‌شود که این مسئله می‌تواند ناشی از انطباق فرکانس اعمال بار بر فرکانس طبیعی ارتعاش سیستم در این نقاط باشد.

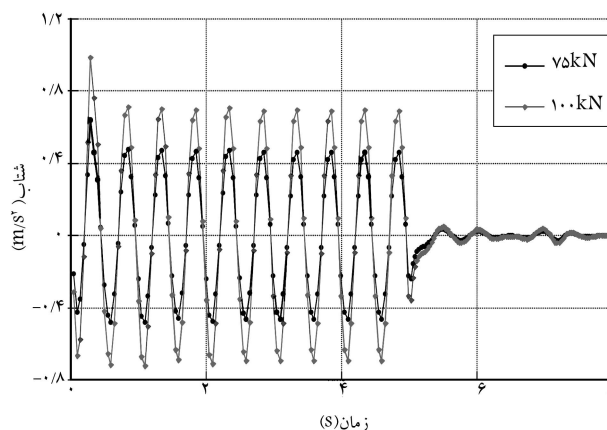
۴.۴.۳. تأثیر ضخامت لایه‌ی آسفالت لاستیکی

یکی از روش‌های کاهش ارتعاش خط، افزایش ضخامت لایه‌ی بتن آسفالتی اصلاح شده با لاستیک است. برای بررسی این موضوع در تحلیل عددی، ضخامت

قطار با سرعت ($\frac{km}{h}$) ۱۳۵ حدود ۲ هرتز است. در این حالت اندازه‌ی بار چرخ‌ها بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلو نیوتن تغییر داده می‌شود. در شکل ۳ میزان کاهش شتاب بیشینه در نقطه‌ی A، برای بارهای محوری ۱۰ و ۱۵ تن نشان داده شده است. جدول ۳ ریشه‌ی میانگین مربعات شتاب و شتاب بیشینه در نقاط A، B و C بر اثر بارهای مختلف را نشان می‌دهد. براساس جدول ۳، تغییرات دامنه‌ی ارتعاش با میزان بار اعمالی بر خط (به خصوص در نقاط دور از خط) کاملاً غیرخطی است. بنابراین وزن قطار باید به عنوان عاملی مهم در میزان ارتعاش خط در نظر گرفته شود.

۳.۴.۳. تأثیر فرکانس بار

حرکت قطار سریع‌السیر با سرعت‌های مختلف موجب اعمال بار با فرکانس‌های متفاوت می‌شود. براین اساس برای تعیین تأثیر فرکانس‌های مختلف (یا سرعت‌های مختلف قطار) شبیه‌سازی مشابه حالت قبل با ۱۵cm، RMAC انجام شده است.



شکل ۳. تأثیر کاهش بار محوری از ۱۵ تن به ۱۰ تن در کاهش شتاب در محل اعمال بار.

جدول ۵. تأثیر ضخامت بستر بر شتاب.

نقطه	فاصله از محل اعمال بار	ضخامت RMAC	A_{RMS}	A_{peak}
A	۰	۱۰	۰٫۳۶۴	۱٫۰۱۳
		۱۵	۰٫۳۵۸	۰٫۹۸۳
		۲۰	۰٫۳۵۳	۰٫۹۶۰
		۳۰	۰٫۳۴۴	۰٫۹۲۲
B	۲۰	۱۰	۰٫۱۸۳	۰٫۳۶۵
		۱۵	۰٫۱۸۳	۰٫۳۶۹
		۲۰	۰٫۱۸۲	۰٫۳۶۳
		۳۰	۰٫۱۷۹	۰٫۳۵۷
C	۴۰	۱۰	۰٫۰۶۲	۰٫۱۸۸
		۱۵	۰٫۰۶۳	۰٫۱۸۷
		۲۰	۰٫۰۶۱	۰٫۱۸۵
		۳۰	۰٫۰۶۰	۰٫۱۸۲

۴. نتیجه‌گیری

با مقایسه‌ی قابلیت‌های بتن آسفالتی اصلاح‌شده با لاستیک (RMAC) با بتن آسفالتی و بالاست در کاهش ارتعاشات وسیله‌ی نقلیه‌ی ریلی، اهم نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های عددی به‌شخص زیر قابل ارائه است:

۱. استفاده از RMAC به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر در مقایسه با خط بالاستی میزان ارتعاشات را ۱۵ درصد کاهش می‌دهد. به‌منظور افزایش کارایی RMAC -- به‌خصوص در نقاط دور از خط -- استفاده از مصالح EPS نیز توصیه می‌شود.

۲. با افزایش بار محوری از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ تن میزان شتاب در خط به‌ترتیب ارتعاش در اثر افزایش بار محوری است. تغییرات ارتعاش به‌خصوص در نقاط دور از خط کاملاً غیرخطی است؛ بنابراین کنترل میزان بار محوری قطار برای کنترل ارتعاش بسیار مهم است.

۳. با اعمال بار با فرکانس‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز میزان شتاب در نقطه A به‌ترتیب ۰٫۳۸، ۰٫۹۸۳، ۳٫۴۲ و ۸٫۷۹ متر بر مجذور ثانیه به‌دست آمده است که نشان‌دهنده‌ی افزایش شتاب با افزایش فرکانس است. با این حال در نقاط B و C (نقاط دور از خط) شتاب ناشی از فرکانس ۱۰ هرتز به‌میزان قابل توجهی کم‌تر از فرکانس ۵ هرتز است.

۴. نرخ کاهش ارتعاش با افزایش ضخامت RMAC، به‌طور قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد. میزان شتاب بیشینه در نقطه‌ی A، برای ضخامت‌های آسفالت ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر به‌ترتیب ۱٫۰۱۳، ۰٫۹۸۳، ۰٫۹۶۰ و ۰٫۹۲۲ متر بر مجذور ثانیه است که نشان می‌دهد با افزایش ضخامت RMAC، میزان کاهش ارتعاش نیز افزایش می‌یابد. اما از نقطه‌نظر اقتصادی به‌کارگیری ضخامت بیش از ۱۵ سانتی‌متر منطقی به نظر نمی‌رسد.

RMAC معادل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۵ نتایج شتاب بیشینه و ریشه‌ی میانگین مربعات شتاب ارائه شده است. با افزایش ضخامت RMAC، میزان کاهش ارتعاش نیز افزایش می‌یابد. با این حال نرخ کاهش ارتعاش با افزایش ضخامت به بیش از ۱۵ سانتی‌متر، به‌طور قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد. در مجموع از نظر ملاحظات اقتصادی، ضخامت ۱۵ سانتی‌متر برای RMAC یک ضخامت بهینه به‌نظر می‌رسد. همچنین براساس این نتایج، ۱۵ سانتی‌متر RMAC، معادل ۳۰ سانتی‌متر بتن آسفالتی در کاهش ارتعاشات موثر است.

پانویس

1. hot mix asphalt (HMA)
2. rubber modified asphalt concrete (RMAC)
3. underlayment
4. Ballast fouling
5. under sleeper pad
6. Ballast mat
7. Centrifuge test
8. expanded poly-styrol
9. finite element
10. absorbent boundary
11. Viscous damping
12. peak acceleration
13. root mean square (RMS)
14. peak to peak

منابع

1. Rose, J.G.; Li, D. and Caldwell, L.A. "Tests and evaluations of in-service asphalt trackbeds", *American Rail-*

way Engineering and Maintenance Association 2002 Annual Conference Proceedings, Washington, DC, p. 16 (September 2002).

2. Rose, J.G. and Hensley, M.J. "Performance of hot mix asphalt railway trackbeds", *Transportation Research Record 1300*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 35-43 (1991).
3. Asphalt Institute "HMA trackbeds-hot mix asphalt for quality railroad and transit trackbeds", *Informational Series 137*, p. 10 (1998).
4. Bahrekazemi, M. "Train-induced ground vibration and its prediction", PhD Thesis, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm (2004).
5. Itoh, K.; Zeng, X.; Murata, O. and Kusakabe, O. "Centrifugal simulation of vibration reduction generated by high-speed trains using rubber-modified asphalt foundation and EPS barrier", *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, **3**(2), pp. 1-10 (2003).
6. Zeng, X.; Rose, J.G. and Rice, J.S. "Stiffness and damping ratio of rubber-modified asphalt mixes: Potential vi-

- bration attenuation for high-speed railway trackbeds”, *Journal of Vibration and Control*, **7**(4), pp. 527-538 (2001).
۷. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مشخصات فنی، عمومی روسازی راه آهن، نشریه شماره (۱/۳۰)، (۱۳۸۵).
8. Wang, J and Zeng, X. “Numerical simulation of vibration attenuation of a high-speed train foundation with different trackbed materials”, *Journal of Vibration and Control*, **10**(8), pp. 1123-1136 (2004).
9. Degrande, G. “Free-field vibrations during the passage of a high-speed train: Experimental results and numerical predictions, in noise and vibration from high-speed trains”, Edited by V.V. Krylov, Thomas Telford, London, pp. 285-314 (2001).
10. Galvi'n, P. and Domi'nguez, J. “Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the Co'rdoba-Ma'laga line”, *journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 641-657, (2008).