

بررسی تأثیر مشخصات خاکریز راه آهن سریع‌السیر بر ارتعاشات در محیط اطراف

مرتضی اسماعیلی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمد فشارکی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: m_esmaeili@iust.ac.ir
دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۴

چکیده

برآورد دقیق میزان ارتعاشات محیطی ایجاد شده ناشی از حرکت قطارهای سریع‌السیر بر خطوط بالاستی، از دو دیدگاه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری دارای اهمیتی کلیدی است. بررسی صورت گرفته در خصوص تحقیقات انجام شده در زمینه ارزیابی ارتعاشات محیطی ناشی از بهره‌برداری از خطوط ریلی نشان‌دهنده آن است که در این روش‌ها نقش اجزای روسازی خط مشتمل بر ریل، ادوات اتصال، تراورس و بالاست به‌خوبی مورد مطالعه قرار گرفته ولی در شرایطی که خط بر خاکریز واقع شده مطالعات جامعی در این مورد صورت نگرفته است. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که وجود اینرسی قابل ملاحظه ناشی از حرم خاکریز و همچنین مشخصات سختی و میرایی آن می‌تواند نقش قابل ملاحظه‌ای در تغییر مشخصات ارتعاشی خط ریلی داشته و به عنوان یک عامل بالقوه امواج انتشار یافته به محیط اطراف را کاهش دهد. بنابراین، در تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی اجزای محدود به‌کار رفته در نرم‌افزار محیط پیوسته ABAQUS تأثیر پارامترهای خاکریز بر انتشار امواج در محیط اطراف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا بار ناشی از عبور محورهای قطار به‌صورت تاریخچه زمانی بار پله‌ای به برنامه معرفی شده و از طرف دیگر از المان‌های نامحدود برای منظور کردن شرایط مرزی محیط نامحدود اطراف استفاده شده است. در یک مطالعه پارامتریک، اثر بار محوری و سرعت عبور لکوموتیو از یک‌سو و از سوی دیگر اثر پارامترهای خاکریز شامل ضخامت (عرض شانه، شیب، ارتفاع)، مدول الاستیسیته (سختی) و میرایی بر میزان ارتعاشات خط و محدوده اطراف آن بررسی شده است. نتایج حساسیت‌سنجی در مورد پارامترهای خاکریز، نشان‌دهنده تأثیر قابل ملاحظه سرعت و بار محوری قطار و همچنین ارتفاع خاکریز بر سطح ارتعاشات در محیط اطراف می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: راه‌آهن سریع‌السیر، انتشار امواج در محیط اطراف، سختی مصالح خاکریز، میرایی مصالح خاکریز، ضخامت خاکریز

۱- مقدمه

ناشی از عبور قطار، در مناطق شهری و حاشیه شهرها ایجاد شده است. این موضوع از یک طرف مسئله بهره‌برداری از خطوط ریلی را به سبب ایجاد آزدگی در ساکنین مناطق مسکونی و بروز آسیب‌های احتمالی در بناهای اطراف، تحت تأثیر قرار داده و از طرف دیگر موجب تسریع روند خرابی اجزای خط و اینبه‌فنی شده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد. از این رو در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی به‌منظور بررسی ارتعاشات

افزایش میزان تقاضای نقل و انتقال بار و مسافر در سال‌های اخیر، سبب توجه روزافزون کشورها به صنعت حمل و نقل ریلی به‌عنوان سیستمی ایمن، ارزان و سازگار با محیط زیست شده است. از سوی دیگر بهره‌برداری از خطوط سریع‌السیر بین شهری، تحولی عظیم در حمل و نقل ریلی را به‌وجود آورده است. با وجود قابلیت بالای این خطوط در انتقال بار و مسافر، همزمان نگرانی‌هایی درخصوص صدا و ارتعاشات ایجاد شده

محیط اطراف انجام داده و اثر این موضوع را بر کاهش ارتعاشات اطراف خط بررسی کردند.

با وجود اهمیت و اثر قابل ملاحظه خاکریز بر ارتعاشات خط، در هیچ یک از بررسی‌های صورت گرفته، تأثیر خاکریز و پارامترهای آن بر ارتعاشات خط، به صورت مستقل مورد توجه قرار نگرفته است. از این رو در تحقیق حاضر، با مدل‌سازی اجزای محدود خط با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، ارتعاشات اجزای روسازه و زیرسازه خط، تحت تأثیر بارهای دینامیکی ناشی از حرکت قطار سریع‌السیر تعیین شده است. همچنین با انجام تحلیل حساسیت بر پارامترهای خاکریز شامل هندسه، ضخامت، سختی و میرایی، تأثیر هر یک بر ارتعاشات منتشر شده از خط به محیط اطراف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- متدولوژی تحقیق و روند مدل‌سازی

در تحقیق حاضر از روش اجزای محدود به کار گرفته شده در نرم‌افزار ABAQUS برای انجام تحلیل دینامیکی مجموعه خط و محیط اطراف در حوزه زمان استفاده شده است. برای این منظور در شرایط دو بعدی و کرنش مسطح، خط آهن بالاستی یک خطه واقع بر خاکریز در نظر گرفته شده است. بارگذاری دینامیکی ناشی از راه آهن سریع‌السیر به صورت بارگذاری پله‌ای تابع زمان منظور و در آن اثرات بارگذاری ناشی از سطح تماس چرخ با ریل منظور شده است. در روند مدل‌سازی، از ریل و ادوات اتصال صرف‌نظر شده و با توجه به ابعاد مدل تنها اجزای خط از تراورس به پایین در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که از دیدگاه نظریه انتشار امواج در محیط‌های نیمه بی‌نهایت، ارضای شرط تشعشع الزامی است در مرزها از المان‌های نامحدود استفاده شده است. با توجه به تمرکز این تحقیق بر اثر پارامترهای خاکریز بر کاهش ارتعاشات، به طور عمده اثر تغییرات پارامترهای هندسی، سختی و میرایی خاکریز در روند تحلیل حساسیت مد نظر قرار داده شده است. در ادامه جزئیات مدل‌سازی عددی اعم از تعریف هندسه، مشخصات مصالح، بارگذاری و المان‌بندی و شرایط مرزی و همچنین روش حل تشریح شده و در بخش دیگری نتایج تحلیل عددی و اعتبارسنجی آن به همراه تحلیل حساسیت‌های صورت گرفته ارائه شده است.

خط ریلی و اثر پارامترهای مختلف بر آن و همچنین روش‌های کاهش ارتعاشات انتقال یافته به سازه‌های اطراف خط، صورت گرفته است.

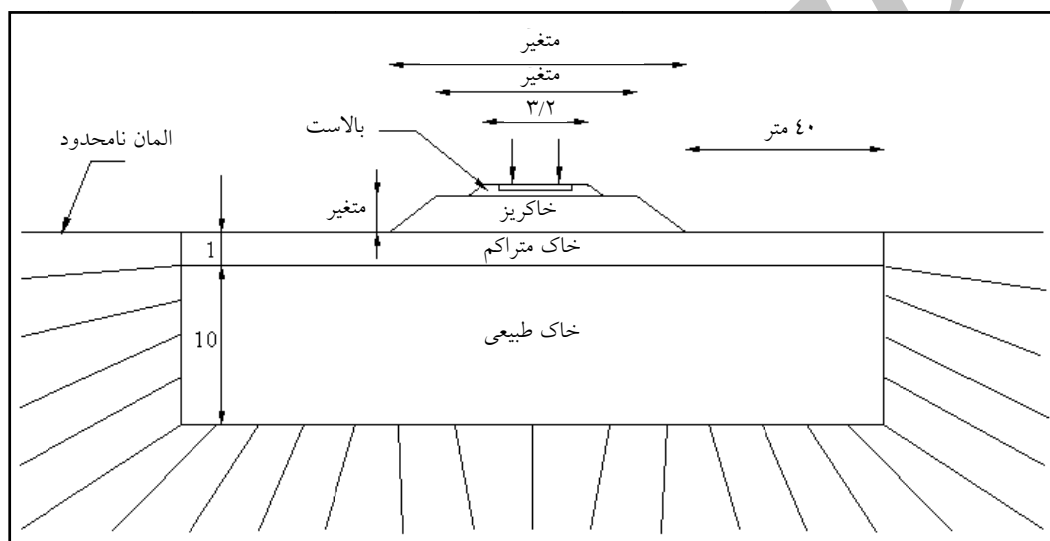
مروری بر ادبیات فنی موجود نشان می‌دهد که به طور کلی برای بررسی ارتعاشات در خطوط ریلی بالاستی دو دیدگاه حاکم بوده است. در دیدگاه نخست، ناوگان به صورت مجموعه‌ای از جرم، فنر و میراگر در نظر گرفته شده و اندرکنش آن با ریل به صورت یک تیر پیوسته و مجموعه‌ای از جرم، فنر و میراگر به عنوان زیرسازه خط بالاستی بررسی شده است. (Grassie et al., 1982; Sunand Dhanasekar, 2002; and Lou et al. 2006). در دیدگاه دوم مجموعه خط و محیط اطراف آن به صورت یک سیستم پیوسته در نظر گرفته شده و ارتعاشات ناشی از بار متحرک ناوگان، در خط و محیط اطراف آن مطالعه شده است. (Bode et al., 2002; Yang et al., 2003; Koh et al., 2007 Lombaert and Degrande, 2009 and Kouroussis et al., 2011). در این میان بررسی ارتعاشات برای شرایطی که خط ریلی بر خاکریز واقع شده است به واسطه جرم قابل ملاحظه خاکریز و مشخصات سختی و میرایی آن دارای اهمیت ویژه‌ای است که گاهی در برخی از کارهای انجام شده در دسته دوم به آن پرداخته شده است.

از جمله تحقیقات صورت گرفته در این خصوص، می‌توان به کار انجام شده توسط (Adam, Panzb and Schmidc, 2000) که در آن با به کارگیری روش‌های اجزای محدود^۱ و المان‌های مرزی^۲، مدل‌های دو بعدی و سه بعدی از خاکریز راه آهن در یک محیط نیمه بی‌نهایت^۳ ارایه شده و اثر خاکریز بر میزان ارتعاشات ایجاد شده در اطراف خط بررسی شده، اشاره کرد. در ادامه (Krylov, 2001)، با به کارگیری توابع گرین^۴ در حل معادله انتشار امواج در یک محیط الاستیک نیمه بی‌نهایت، تأثیر خاکریز بر انتشار امواج را مورد بررسی قرار داد. در تحقیق دیگری توسط (Hall, 2002) با مقایسه نتایج مدل سه بعدی اجزای محدود با مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی، تطابق ارتعاشات خاکریز در شرایط واقعی با نتایج مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه (Ditzel and Herman, 2003)، با استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی، ضمن بررسی تأثیر خاکریز راه آهن بر ارتعاشات خط، مقایسه‌ای میان فرکانس‌های ارتعاش خاکریز و

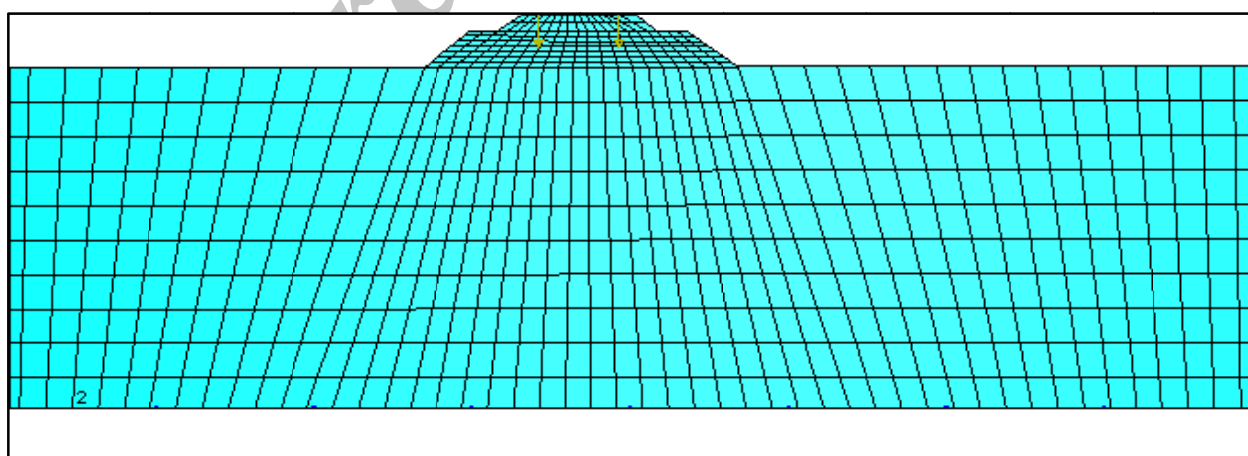
۱-۲- مشخصات هندسی در مدل‌سازی عددی

همچنین از دیدگاه حل عددی و به منظور توزیع مناسب تنش زیر تراورس، عمق بستر طبیعی برابر ۱۰ متر (حدود چهار برابر طول تراورس) منظور شده است. از آنجا که در بخشی از مطالعات، هدف، بررسی امواج منتشر شده به محیط اطراف می‌باشد، عرض مدل از هر طرف خط تا ۴۰ متر امتداد یافته است. در عین حال برای بررسی اثر هندسه خاکریز بر ارتعاشات منتشره از خط به محیط اطراف، سه پارامتر عرض شانه خاکریز، شیب و ضخامت (ارتفاع) خاکریز متغیر فرض شده و به این ترتیب تأثیر شکل خاکریز بر نتایج مورد نظر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱، ابعاد شماتیک مدل و شکل ۲ المان‌بندی مسئله در برنامه ABAQUS را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، مدل‌سازی اجزای خط، بر اساس مسیر یک خطه استاندارد ایران انجام گرفته است. عرض مسیر راه آهن برابر ۳/۲ متر، طول و ضخامت تراورس‌های بتنی مدل‌سازی شده، به ترتیب ۲/۴ و ۰/۲۵ متر و عرض شانه بالاست، ۴۰ سانتی‌متر انتخاب شده است. همچنین شیب‌های طرفین بالاست ۱:۱/۵ در نظر گرفته شده است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۵). همه اجزای زیرسازی خط، شامل لایه بالاست، خاکریز، خاک متراکم و خاک طبیعی در روند مدل‌سازی منظور شده‌اند. مطابق توصیه‌های اجرایی (UIC719R, 1994) ضخامت خاک متراکم برابر یک متر و



شکل ۱. طرح شماتیک خط و خاکریز مدل‌سازی شده در برنامه ABAQUS



شکل ۲. المان‌بندی خط و خاکریز در برنامه ABAQUS

۲-۲- سختی و مدل رفتاری

از نظر مشخصات رفتاری مصالح در مدل مورد بحث، تنها مدل رفتاری تراورس الاستیک خطی در نظر گرفته شده و سایر مصالح خاکی با مدل رفتاری موهر-کولمب و به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مشخصات خاک متراکم، مشابه مشخصات لایه خاکریز در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مدول الاستیسیته برای لایه خاکریز بر اساس توصیه‌های اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها در آیین‌نامه UIC719 و همچنین مقادیر پیشنهادی در تحقیق (Madshusand, 2001) (Kaynia) انتخاب شده است. مقادیر حداقل سختی بدنه باربر و بستر خاکریز ارایه شده توسط آیین‌نامه UIC719، به نوع دیگری در نشریه شماره ۳۹۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تحت عنوان "دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن سریع‌السیر" نیز تکرار شده است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، نشریه ۳۹۴، ۱۳۸۵). در این مقاله سایر مشخصات بر اساس مطالعات میدانی صورت گرفته توسط (Degrande, 2001) در مدل‌سازی منظور شده است. جدول ۱ مشخصات مصالح مدل را نشان می‌دهد.

۳-۲- میرایی

برای اعمال میرایی مصالح در روند تحلیل دینامیکی، روش‌های متنوعی در ادبیات فنی ارایه شده است. با عنایت به سهولت کاربرد روش رایله^۱، در تحقیق حاضر از این روش برای تعریف میرایی مصالح استفاده شده است. در این روش، میرایی از ترکیب دو بخش شامل اثر جرم و اثر سختی تشکیل گردیده است:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

در رابطه فوق، M و K ، به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی سازه می‌باشند. ضریب α و β به ترتیب میزان تأثیر جرم و سختی در میرایی سیستم را نشان می‌دهد. رابطه میان ضرایب میرایی رایله با احتساب تعامد مدها به صورت زیر قابل بیان است (Park and Hashash, 2004).

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2\omega_i \zeta_i \quad (2)$$

برای یافتن ضرایب α و β در یک مصالح خاص لازم است که با داشتن فرکانس‌های غالب طبیعی ω_1 و ω_2 کل سیستم و نسبت‌های میرایی مودال مربوط به آنها، یک دستگاه دو معادله - دو مجهول را تشکیل داده و ضرایب مربوطه را محاسبه کرد. نتایج بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که مقادیر نسبت‌های میرایی مودال در فرکانس‌های غالب نزدیک به یکدیگر می‌باشد. بنابراین، می‌توان مقادیر ζ_1 و ζ_2 را تقریباً مساوی فرض کرد (Chopra, 1995). از طرف دیگر برای آنکه در فرکانس غالب کل مدل، میرایی حداقل شود، می‌توان از پیشنهاد ارایه شده توسط (Hudson, Idriss and Beikae, 1994) استفاده کرد که بر این اساس، شکل ساده شده معادله (۲) این چنین است:

$$\alpha = \zeta_{\min} \omega_{\min} \quad (3)$$

$$\beta = \zeta_{\min} / \omega_{\min}$$

که در آن ω_{\min} ، اولین فرکانس غالب طبیعی کل سیستم و ζ_{\min} ، میرایی مودال مربوط به یک مصالح خاص در سیستم است. با این رویکرد در مسئله حاضر، نسبت میرایی بتن مورد استفاده در تراورس و مصالح خاکی (شامل بالاست، خاک متراکم و خاک طبیعی) به ترتیب 0.01 و 0.02 در نظر گرفته شده و متعاقب آن با داشتن فرکانس طبیعی کل سیستم، مقادیر α و β به صورت مندرج در جدول ۲ محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر فوق برای خاکریز با ضخامت ۳ متر به دست آمده‌اند.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

میرایی	مدل رفتاری	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (پاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (پاسکال)	زاویه اتساع (درجه)
-	الاستیک	۲۴۸۰	۰/۳	2.67×10^{11}	-	-	-
۲۲/۵	موهر-کولمب	۲۰۹۲	۰/۳	1.72×10^7	۳۱	۱۰۰۰	۲۲/۵
۲۱/۸	موهر-کولمب	۲۰۹۲	۰/۳	8×10^6	۳۰	۱۰۰۰	۲۱/۸
۲۲/۵	موهر-کولمب	۱۸۹۰	۰/۳	8×10^6	۳۱	۱۰۰۰	۲۲/۵

جدول ۲. مقادیر ضرایب میرایی رایله برای مصالح مختلف

مصالح	α	β
تراورس	۰/۰۷۸۳	۰/۰۰۱۳
بالاست	۰/۱۵۶۶	۰/۰۰۲۶
خاکریز و خاک متراکم	۰/۱۵۶۶	۰/۰۰۲۶
خاک طبیعی	۰/۱۵۶۶	۰/۰۰۲۶

به صورت یک سری بار گسترده یکنواخت بر خط وارد شده است. نیروهای ایجاد شده در چرخ و ریل و اندرکنش بین آنها توسط نظریه هرتز^۱ تشریح می‌شود. بر این اساس تغییر شکل الاستیک بین فولاد چرخ و ریل، یک سطح تماس بیضی شکل ایجاد می‌کند که این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد بیضی تماس وابسته به میزان نیروهای قائم در ناحیه تماس از یک سو و از سوی دیگر وابسته به انحنای پروفیل ریل و چرخ است (Esveld, 2001). به طور معمول فشار ماکزیمم در مرکز سطح تماس ایجاد می‌شود.

در مدل اجزای محدود، برای تعیین ناحیه تماس چرخ و ریل، از فرض سطح تماس دو استوانه متحرک استفاده می‌شود. اگر ریل و چرخ به صورت دو استوانه متحرک بر یکدیگر در نظر گرفته شوند، سطح تماس حاصل یک دایره خواهد بود. اگر ضریب پواسون چرخ و ریل، ν_1 و ν_2 و مدول الاستیسیته، E_1 و E_2 ، در نظر گرفته شود، شعاع تماس، a ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (4)$$

در رابطه فوق داریم:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6)$$

R_1 و R_2 در رابطه فوق، شعاع چرخ و ریل و P ، فشار وارده از چرخ است.

به عنوان مثال برای چرخ با قطر ۹۰۰ میلی‌متر، با بار محوری ۷۲۵۰۰ نیوتن و با فرض بی‌نهایت بودن شعاع ریل، شعاع دایره توزیع تنش برابر با ۰/۰۰۶۱ متر می‌گردد.

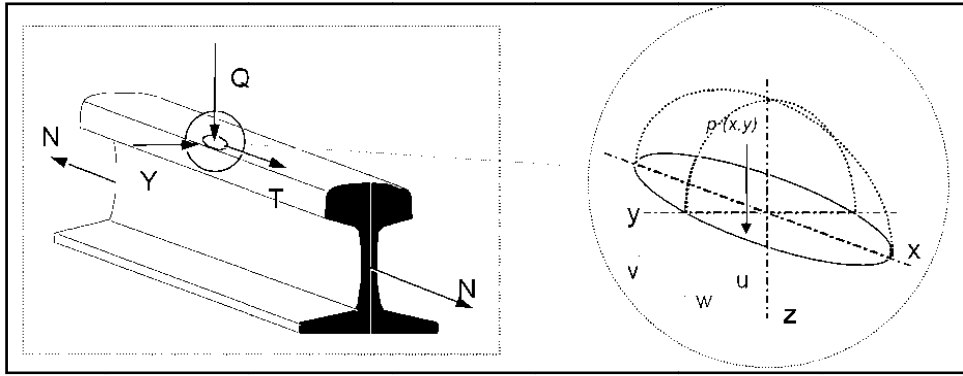
در این مقاله، فرض می‌شود که ضربه ناشی از بار دینامیکی قطار، در طول شعاع سطح تماس به صورت یکنواخت توزیع شود. در نتیجه در مدل‌سازی، بار قطار به صورت مجموعه‌ای از بارهای گسترده یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای بارگذاری از قطار سریع‌السیر Thalys استفاده شده است. شکل ۴ نمایی از این قطار و بار ضربه‌ای اعمالی از آن بر خط را نشان می‌دهد. در این شکل بار لکوموتیو و واگن‌ها به ترتیب ۱۷ و ۱۴ تن فرض شده است.

۲-۴- المان‌بندی، شرایط مرزی و روش حل

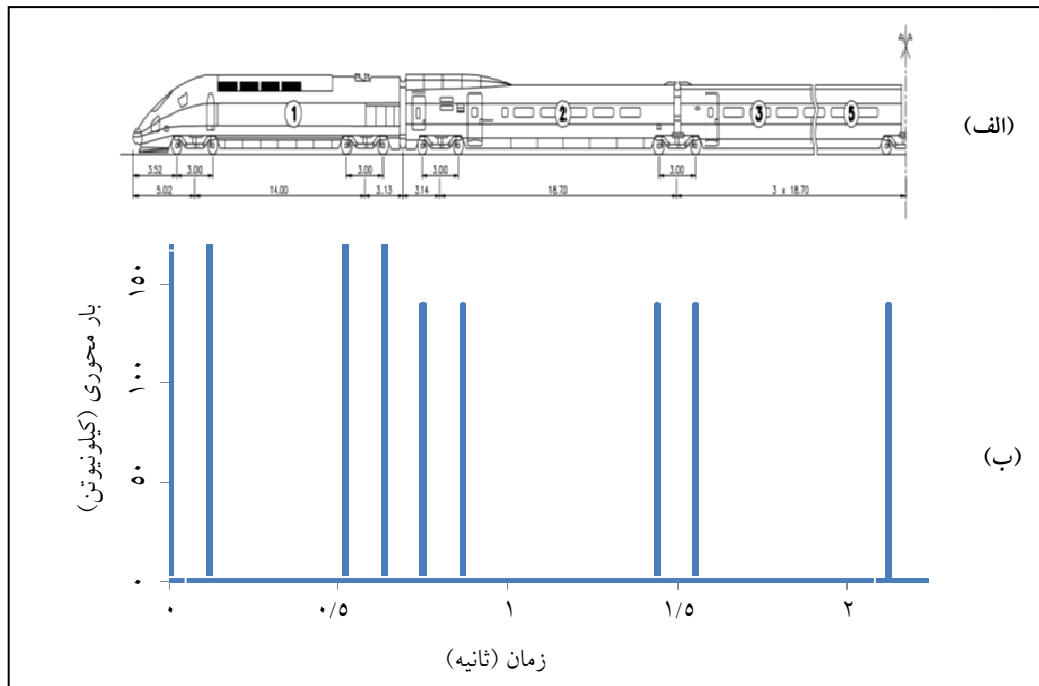
یکی از مسایل مهم در روند تحلیل دینامیکی ارتعاشات ریلی، ارضای شرط تشعشع^۷ در مسئله با استفاده از ابزار مناسب می‌باشد. این مسئله به آن معنی است که ارتعاشات ایجاد شده در محیط، ضمن حرکت به طرف مرزهای بی‌نهایت به صورت هندسی میرا شده و بازگشتی نداشته باشند. در برنامه ABAQUS امکان اعمال شرایط مرزی متناسب با مسایل دینامیکی از طریق استفاده از المان‌های نامحدود^۸ فراهم آمده و با استفاده از آن شرایط مرز آرام در مدل اجزای محدود ایجاد می‌گردد. به عبارت دیگر در طی حل دینامیکی، المان‌های نامحدود، ترکشن‌های برشی و نرمال در مرز المان‌های محدود ایجاد می‌کنند. این نیروها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بازگشت امواج برشی و حجمی به داخل شبکه المان‌های محدود و حداقل شود. در مسئله حاضر، المان نامحدود CINPE4 چهارگره‌ای که برای حل مسایل کرنش صفحه‌ای مناسب است، مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، این المان‌ها در سمت چپ و راست مدل و در امتداد مرزها تعبیه شده‌اند. اجزای خط و مصالح خاکریز نیز توسط المان‌های چهارگره‌ای CPE4R المان‌بندی شده‌اند. همچنین برای حل مسئله دینامیکی ارتعاشات ناشی از عبور قطار، از روش مستقیم انتگرال‌گیری در حوزه زمان استفاده شده است. با توجه به بارگذاری و مصالح تعریف شده، روش حل ضمنی^۹ برنامه ABAQUS در حل مسئله به کار رفته است.

۲-۵- بارگذاری ناشی از حرکت قطار سریع‌السیر

با توجه به این‌که تمرکز این مقاله بر خط و مصالح خاکی اطراف آن می‌باشد، وسیله نقلیه ریلی مدل‌سازی نشده و بار قطار



شکل ۳. سطح تماس چرخ و ریل (Esveld, 2001)



شکل ۴. الف) شکل شماتیک قطار سریع‌السیر Thalys و بارگذاری ناشی از آن ب) بارگذاری ضربه‌ای معادل قطار

با نتایج به‌دست آمده از آزمایشات بر یکدیگر منطبق شوند و به این روش کالیبراسیون مدل عددی با اطلاعات میدانی صورت گرفته است.

۳-۱- اندازه‌گیری میدانی

شش هفته پیش از افتتاح خط سریع‌السیر بروکسل-پاریس، شرکت راه آهن بلژیک، آزمایش‌هایی برای بررسی ارتعاشات خط در هنگام عبور قطارهای سریع‌السیر با سرعت‌های ۱۶۰ تا ۳۳۰ کیلومتر بر ساعت انجام داد. این آزمایشات در فواصل ۴ تا ۷۲ متر از مرکز خط انجام شد. قطارهای عبوری از نوع Thalys

۳- کالیبراسیون و معتبرسازی مدل عددی

به منظور بررسی صحت کارکرد مدل عددی، مقایسه‌ای میان نتایج این روش با نتایج آزمایشات میدانی انجام شده روی یکی از خطوط سریع‌السیر صورت گرفته است. بررسی روند تغییرات و مقدار ارتعاشات ثبت شده در نقاط پیرامونی خط در هر دو روش، معیار مناسبی برای ارزیابی صحت عملکرد مدل عددی خواهد بود. در این راستا با توجه به آنکه مشخصات مصالح خاکی محل آزمایشات میدانی شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و میرایی به‌طور دقیق در دسترس نبوده است، در مدل عددی این مشخصات به گونه‌ای تغییر داده شده است که نتایج تحلیل عددی

فرکانس‌های بالاتر توسط مصالح و استهلاک هندسی، میرا شده‌اند، به طوری که نمی‌توان فرکانس عبور از تراورس را در این طیف‌ها مشاهده کرد. با این حال، هنوز فرکانس‌های پایین‌تر، (فرکانس بوژی و محور) در طیف مشخص می‌باشد.

۳-۲- مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی و عددی

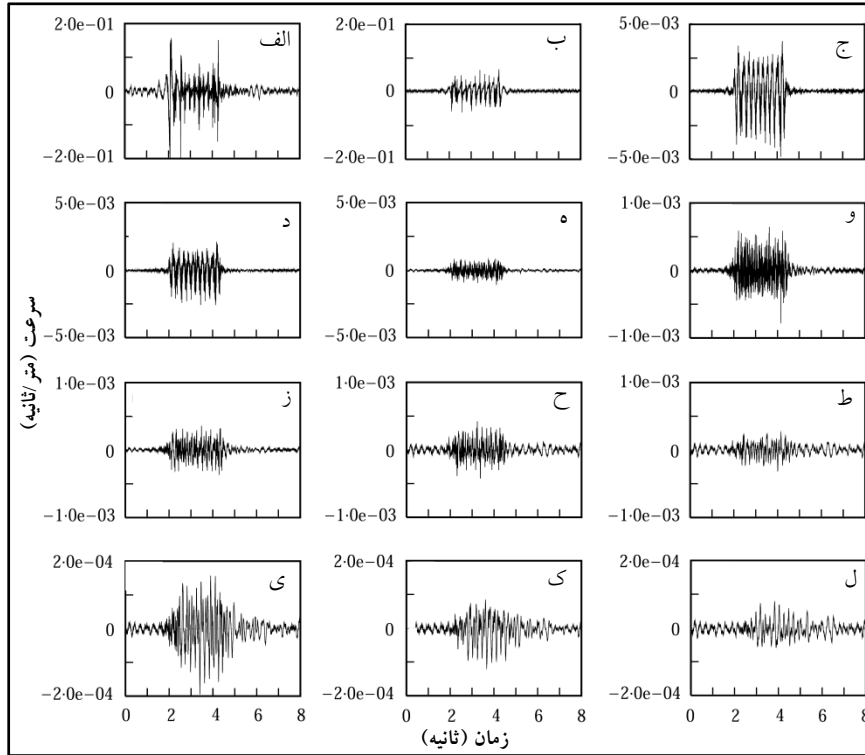
شکل‌های ۷ و ۸ بیانگر نتایج به‌دست آمده از مدل عددی می‌باشد. شکل ۷، سرعت ارتعاش خاک در فواصل ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۲۲ و ۴۰ متر از خط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از خط، میزان سرعت ارتعاش، کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته و از 0.14 متر بر ثانیه در فاصله ۲ متر از خط به 2×10^{-4} در فاصله ۴۰ متری می‌رسد که ۱۹ برابر کمتر از سرعت ارتعاش در فاصله ۴ متری از خط است. مقایسه این شکل و شکل ۵ نشان‌دهنده تطابق خوب نتایج مدل عددی با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی (0.2 در فاصله ۲ متر از خط و 2×10^{-4} در فاصله ۴۰ متری) است. شکل ۸ محتوای فرکانسی سرعت قائم خاک در فواصل مختلف از مرکز خط را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و میدانی صورت گرفته، نشان‌دهنده آن است که نتایج به‌دست آمده در فواصل نزدیک به خط، انطباق خوبی با یکدیگر داشته و هر چه از خط دور می‌شویم، میزان خطای مشاهده شده بیشتر می‌شود. همچنین به دلیل ساده‌سازی‌های مسئله عددی و کمتر بودن عوامل تحریک در مدل، تعدادی از فرکانس‌ها، مانند فرکانس عبور تراورس مشاهده نمی‌شود. با این حال، این نتایج برای نقاط نزدیک به خط که در بررسی ارتعاشات خط از اهمیت بیشتری برخوردارند، معتبر می‌باشد.

بوده که از دو لکوموتیو و هشت واگن تشکیل شده و طول کل آن $200/18$ متر می‌باشد. لکوموتیوها شامل دو بوژی و هر بوژی دارای دو محور است. واگن‌های میانی دارای بوژی‌های مشترک هستند. بنابراین، تعداد کل بوژی‌ها و محورها به ترتیب ۱۳ و ۲۶ عدد می‌باشد. جدول ۳-۵ طول واگن L_t ، فاصله بین بوژی‌ها، L_b ، فاصله بین محورها، L_a و بار محوری M_t ، را نشان می‌دهد. خط مورد مطالعه، بالاستی، با ریل UIC60 و پابندهای پاندرول می‌باشد. تراورس‌های مورد استفاده بتنی و مونو بلوک با طول $2/5$ متر، عرض $0/285$ متر و ارتفاع $0/205$ متر می‌باشند (Degrande, 2001).

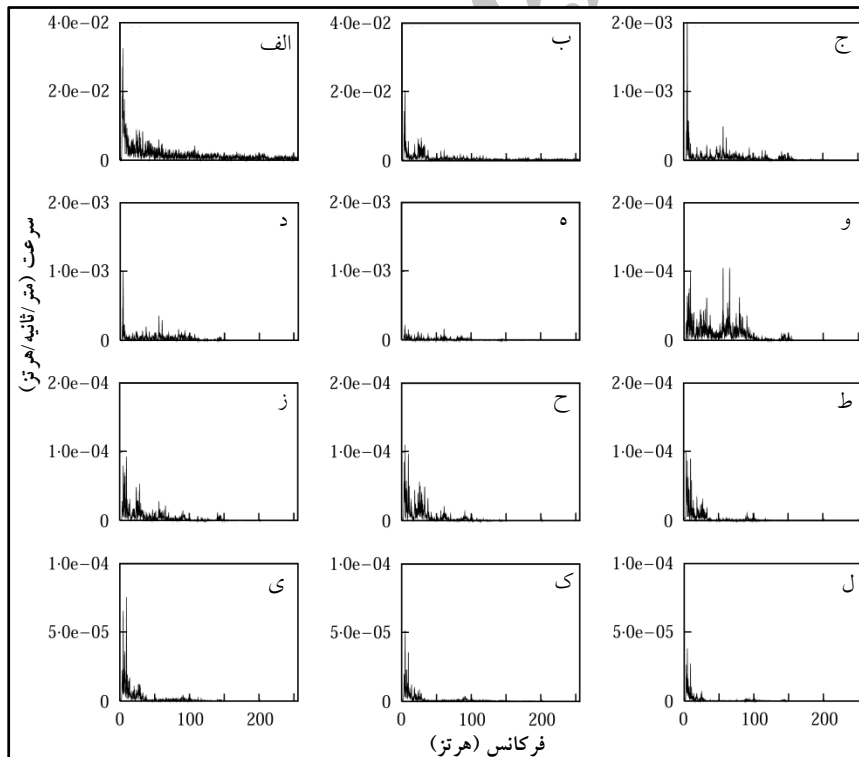
شکل‌های ۵ و ۶ تاریخچه زمانی سرعت ارتعاش و محتوای فرکانسی سرعت قائم را برای ریل و تراورس و همچنین بستر، در فواصل مختلف از مرکز خط، نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در فواصل نزدیک به خط، (تا فاصله ۶ متر از مرکز خط)، عبور بوژی‌های قطار قابل مشاهده است ولی نمی‌توان محورهای بوژی را تشخیص داد. حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۶ متر از خط $2/5$ میلی‌متر بر ثانیه است. با توجه به مشخصات قطار، طیف سرعت مشاهده شده در این نقطه، تقریباً گسسته است و حداکثر فرکانس مشاهده شده، فرکانس عبور بوژی ($4/66$ هرتز) است. همچنین فرکانس تراورس ($145/37$ هرتز) نیز قابل تشخیص است (فاصله بین تراورس‌ها مساوی با $0/6$ متر). در دیگر نقاط نزدیک به خط نیز چنین نتایجی قابل دریافت است. در نقاط دور از خط، می‌توان تأثیر میرایی مصالح و استهلاک هندسی را مشاهده کرد. برای مثال در فاصله ۴۰ متری از خط، حداکثر سرعت ذرات، $0/2$ میلی‌متر بر ثانیه است که $12/5$ برابر کمتر از سرعت در فاصله ۶ متری از خط است. بررسی طیف سرعت این نقاط نشان می‌دهد که

جدول ۳. مشخصات قطار Thalys (Degrande, 2001)

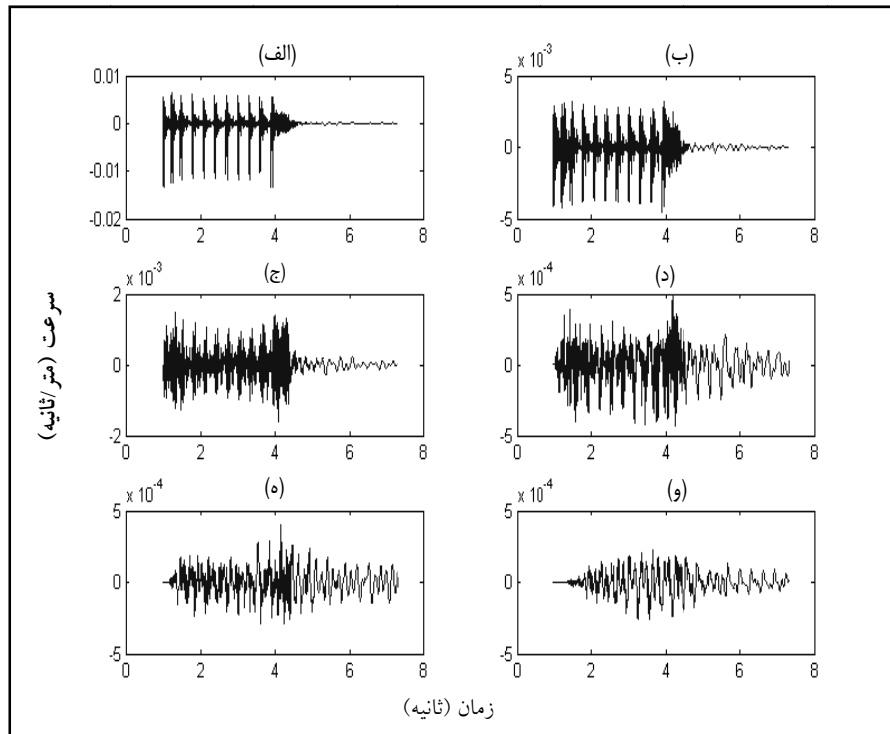
محور/ واگن	لکوموتیو	واگن خارجی	واگن داخلی
L_t (m)	۲۲/۱۵	۲۱/۸۴	۱۸/۷
L_b (m)	۱۴	۱۸/۷	۱۸/۷
L_a (m)	۳	۳	۳
M_t (Kg)	۱۷۰۰۰	۱۴۵۰۰	۱۷۰۰۰



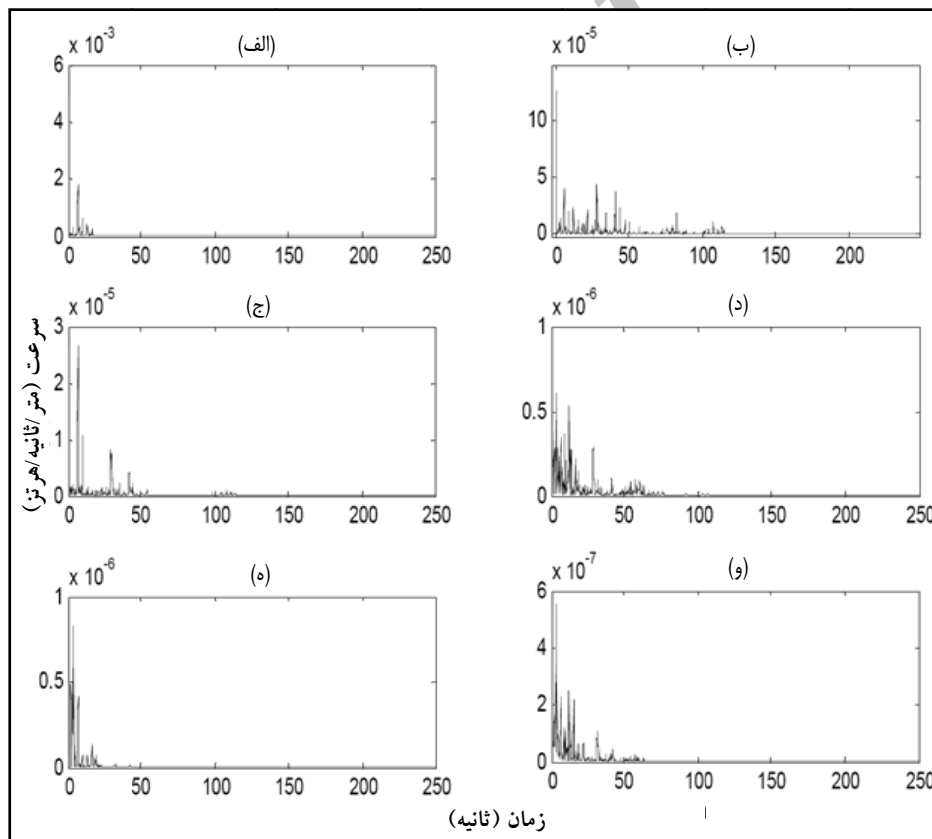
شکل ۵. سرعت ارتعاش به دست آمده از اندازه‌گیری میدانی برای نقاط در فاصله (الف) زیر ریل، (ب) زیر تراورس، (ج) ۴ متر، (د) ۶ متر، (ه) ۸ متر، (و) ۱۲ متر، (ز) ۱۶ متر، (ح) ۲۴ متر، (ط) ۳۲ متر، (ی) ۴۰ متر، (ک) ۵۶ متر و (ل) ۷۲ متر (Degrande, 2001)



شکل ۶. طیف سرعت ارتعاش به دست آمده از اندازه‌گیری میدانی برای نقاط در فاصله (الف) زیر ریل، (ب) زیر تراورس، (ج) ۴ متر، (د) ۶ متر، (ه) ۸ متر، (و) ۱۲ متر، (ز) ۱۶ متر، (ح) ۲۴ متر، (ط) ۳۲ متر، (ی) ۴۰ متر، (ک) ۵۶ متر و (ل) ۷۲ متر (Degrande, 2001)



شکل ۷. سرعت ارتعاش به‌دست آمده از مدل اجزای محدود در فاصله (الف) ۲ متر، (ب) ۴ متر، (ج) ۸ متر، (د) ۱۶ متر، (ه) ۲۲ متر و (و) ۴۰ متر



شکل ۸. طیف سرعت ارتعاش به‌دست آمده از مدل اجزای محدود برای نقاط در فاصله (الف) ۲ متر، (ب) ۴ متر، (ج) ۸ متر، (د) ۱۶ متر، (ه) ۲۲ متر و (و) ۴۰ متر

الاستیسیته خاکریز، پیشنهادات رایج شده در آیین‌نامه (UIC719R, 1994) بوده است. سایر مقادیر و پارامترهای هندسی انتخاب شده با عنایت به پیشنهادات (Madshus and Kaynia, 2001) و (Wang and Zeng, 2004) انتخاب شده‌اند. در ادامه روند انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای مختلف تشریح می‌گردد. لازم به ذکر است که در شرایطی که روی یک پارامتر مشخص تحلیل حساسیت صورت گرفته است سایر پارامترها مطابق مقادیر جدول ۴، در حد متوسط نگه داشته شوند.

جدول ۴. محدوده پارامترهای به کار رفته در تحلیل حساسیت

پارامتر	محدوده مقادیر	واحد
مدول الاستیسیته خاکریز	۴۰-۱۰۰	مگاپاسکال
ضخامت خاکریز	۰-۵	متر
عرض خاکریز	۴/۵-۸	متر
شیب خاکریز	۱:۱ و ۱:۱/۵ و ۱:۲ و ۱:۳	-
بار محوری	۱۲-۱۷	تن
سرعت	۱۰۰-۳۵۰	کیلومتر بر ساعت

۵-۱- تأثیر عرض و شیب خاکریز

یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان ارتعاشات خط وضعیت هندسی خاکریز راه آهن است. بر اساس نظر اتحادیه بین‌المللی راه آهن‌ها (719RUIC) معمولاً شیب خاکریز ۱:۱/۵ یا ۱:۲ اختیار می‌گردد، البته برخی از خطوط راه آهن در مواردی مانند وجود مصالح سنگریزه درشت، همچنین شانه‌های خاکی در صورت نیاز از شیب ۱:۱ یا ۱:۱/۲۵ نیز استفاده می‌کنند. برای بررسی میزان تأثیر شیب خاکریز و در نتیجه ضخامت خاکریز در ارتعاشات خط از شیب‌های ۱:۱، ۱:۱/۵، ۱:۲ و ۱:۳ استفاده شده است. در حین انجام تحلیل، سایر پارامترها ثابت فرض می‌شوند. در این تحلیل از قطار سریع‌السیر با سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت استفاده و ارتفاع خاکریز ۳ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۹-الف) تأثیر شیب خاکریز را در کاهش ارتعاشات خط نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تغییر شیب خاکریز از ۱:۱ به ۱:۳ باعث کاهش ارتعاشات به خصوص در فواصل نزدیک به خط

۴- معرفی معیار اندازه‌گیری ارتعاش در محیط

از آنجا که در بخش بعد مطالعه پارامتریکی روی مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای خط به منظور میزان تأثیر آنها بر ارتعاشات منتشر شده در محیط اطراف رایج خواهد شد، لازم است معیاری برای اندازه‌گیری کمی ارتعاشات و امکان مقایسه آنها معرفی گردد. در تحقیق حاضر برای بررسی ارتعاشات و میزان ارتعاشات مجاز از مقیاس دسی بل^{۱۱} مطابق تعریف رایج شده در ضوابط اداره حمل و نقل آمریکا^{۱۲} (DOT, 2005) استفاده شده است. بر این اساس سطح ارتعاشات ایجاد شده در خط با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$V_{dB} = 20 \log \frac{V_{rms}}{V_{ref}} \quad (7)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (8)$$

که در رابطه فوق، V_{dB} ، سطح ارتعاشات خط با مقیاس دسی بل، V_{ref} ، سرعت مرجع می‌باشد که در کشورهای مختلف از مبنای مختلفی استفاده می‌شود. در آمریکا مرجع مورد استفاده 1×10^{-6} اینچ بر ثانیه و در سایر نقاط دنیا 1×10^{-8} و 0.5×10^{-8} متر بر ثانیه می‌باشد. در این مقاله، از ضوابط اداره حمل و نقل آمریکا و عدد مرجع 1×10^{-6} اینچ بر ثانیه استفاده شده است.

۵- مطالعه پارامتریک روی عوامل مؤثر بر سطح

ارتعاش در محیط اطراف

در این بخش رفتار ارتعاشی خط ریلی با تکیه بر پارامترهای تأثیرگذار بر آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به مطالعه قبلی صورت گرفته توسط مؤلفان (اسماعیلی و فشارکی، ۱۳۸۸)، از میان پارامترهای مؤثر بر رفتار دینامیکی خط ریلی متکی بر خاکریز، سختی و ضخامت خاکریز و همچنین بار محوری و سرعت از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. بر این مبنا و با دید تمرکز بر نقش خاکریز بر رفتار ارتعاشی خط، پارامترهای نشان داده شده در جدول ۴ در محدوده مشخص شده برای انجام تحلیل حساسیت انتخاب شده‌اند.

لازم به ذکر است که با توجه به ملاحظه بیشترین تأثیر ارتفاع خاکریز در کاهش ارتعاشات در مطالعات قبلی، محدوده ضخامت خاکریز بین صفر تا ۵ متر تغییر داده شده است. ملاک تغییر مدول

۳-۵- تأثیر سختی خاکریز

با توجه به ماهیت دینامیکی مسئله ارتعاشات خط و نقش قابل توجه خاکریز بر آن، یکی از عوامل تأثیرگذار در سطح ارتعاشات، سختی لایه خاکریز است. محدوده سختی مجاز خاکریز توسط UIC719R پیشنهاد گردید. برای بررسی این موضوع مدول الاستیسیته خاکریز در محدوده اشاره شده در جدول ۴ تغییر داده شده است. شکل (۱۰-ب) میزان تأثیر مدول الاستیسیته خاکریز در فواصل مختلف از خط برای بار محوری ۱۵ تن و سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و خاکریز با ارتفاع ۳ متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود با افزایش سختی خاکریز، ارتعاشات خط کاهش یافته و با افزایش فاصله از محل اعمال بار و خاکریز، از تأثیر آن در کاهش ارتعاش کاسته می‌شود. در نزدیکی محل اعمال بار، افزایش سختی خاکریز منجر به کاهش حدود ۱۵ دسی بل در ارتعاشات خط می‌شود. این کاهش ارتعاش برای نقطه‌ای در فاصله ۴۰ متر از خط به حدود ۴ دسی بل کاهش پیدا می‌کند.

می‌شود. در فاصله ۳ متری از محل اعمال بار حدود ۲۰ دسی بل کاهش ارتعاش مشاهده می‌شود. با افزایش فاصله از خط، تأثیر هندسه خاکریز در ارتعاش کاهش می‌یابد. در فاصله ۴۰ متری از خط حدود ۵ دسی بل کاهش ارتعاش مشاهده می‌شود. عامل هندسی تأثیرگذار دیگر، عرض شانه خاکریز است. با افزایش عرض خط و اضافه شدن جرم و میرایی ناشی از خاکریز، انتظار می‌رود که سطح ارتعاشات خط کاهش یابد. برای این منظور، عرض خاکریز بین ۴/۵ تا ۸ متر تغییر داده شده است. شکل (۹-ب) نتایج به دست آمده برای دو نقطه با فواصل ۳ و ۳۰ متر از خط را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، میزان کاهش ارتعاش در نقاط نزدیک به خط بیشتر از کاهش ارتعاش برای نقاط دور از خط است. حداکثر کاهش ارتعاش مشاهده شده در نزدیکی خط ۱۴ دسی بل است، در حالی که این میزان برای نقطه با فاصله ۳۰ متر، تنها ۵ دسی بل است.

۲-۵- تأثیر ارتفاع خاکریز

تحقیق صورت گرفته توسط مؤلفان مقاله (اسماعیلی و فشارکی، ۱۳۸۸)، نشان می‌دهد که تأثیر افزایش ارتفاع خاکریز تا ۳ متر به علت افزایش جرم کاهش سطح ارتعاش بسیار قابل توجه بوده و پس از آن افزایش ارتفاع خاکریز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش ارتعاشات اجزای خط نداشته است.

در تحقیق حاضر با دید کاهش ارتعاشات منتشره به محیط اطراف بررسی مشابهی صورت گرفته است. همان‌گونه که در شکل (۱۱-الف) ملاحظه می‌شود، میزان کاهش ارتعاش تحت تأثیر افزایش ارتفاع خاکریز برای قطار سریع‌السیر با سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و بار محوری ۱۵ تن در فاصله ۲۰ متری از خط نشان داده شده است. با توجه به شکل یاد شده روند کاهش ارتعاش، در ابتدا شیب زیادی داشته که با افزایش ضخامت خاکریز به تدریج از میزان تأثیر آن کاسته می‌شود و شیب منحنی کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به شکل، می‌توان ارتفاع بهینه خاکریز جهت کاهش ارتعاش را ۳ متر در نظر گرفت. این موضوع هم‌خوانی مناسبی را با مطالعه قبلی صورت گرفته به وسیله مؤلفان نشان می‌دهد.

۴-۵- تأثیر سرعت قطار در ارتعاشات خط

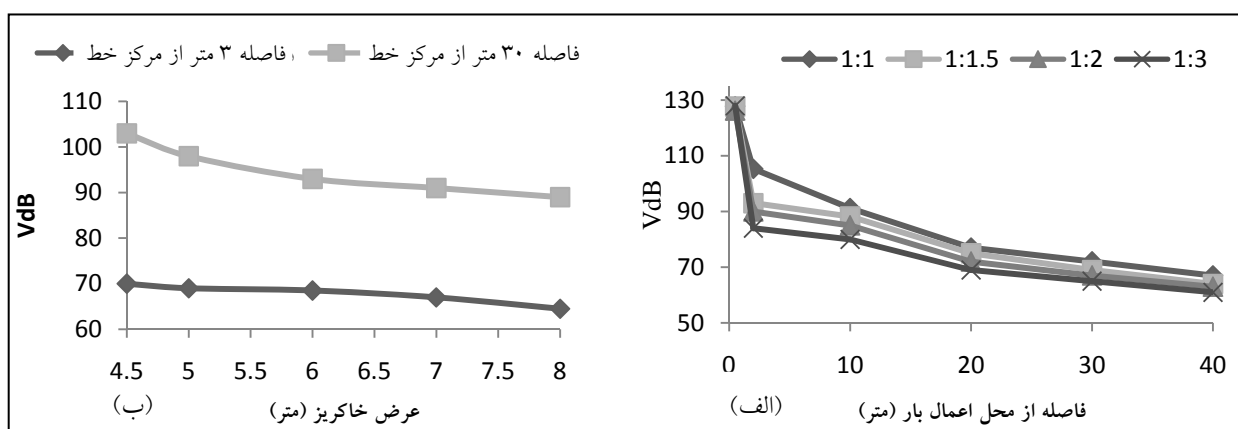
برای بررسی میزان تأثیر پارامتر سرعت، سرعت قطار سریع‌السیر Thalys بین ۱۰۰ تا ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت تغییر داده شده است. بار محوری قطار در این حالت ۱۵ تن در نظر گرفته شده است و شیب خاکریز ۱:۱/۵ می‌باشد. شکل (۱۱-الف) منحنی تغییرات سطح ارتعاش خط در فاصله ۳۰ متری از خط را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش سرعت قطار به بیش از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت، شیب افزایش ارتعاش، بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر سرعت افزایش سرعت قطار در محدوده بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، بیشترین تأثیر را بر افزایش ارتعاشات خط دارد.

۵-۵- تأثیر بار محوری قطار در ارتعاشات خط

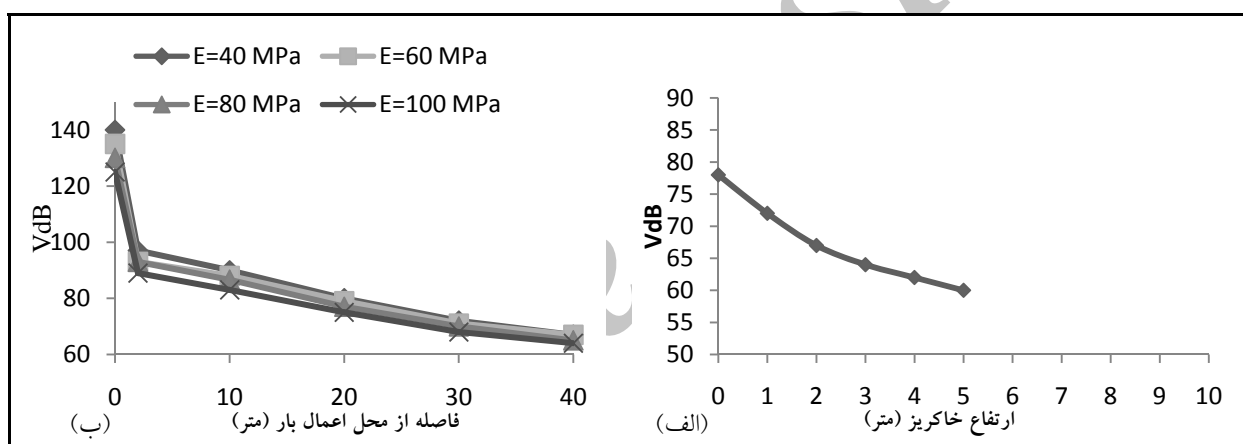
نتایج مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که بار محوری به‌خصوص در سرعت‌های بالا، تأثیر زیادی در سطح ارتعاش خط متکی بر خاکریز دارد (اسماعیلی و فشارکی، ۱۳۸۸). به همین دلیل در این مقاله، تنها تأثیر بار محوری در سرعت‌های بالا بررسی شده است. در مدل‌سازی خط، تأثیر بار محوری برای قطار سریع‌السیر Thalys مطابق شکل (۱۱-ب) می‌باشد. در تحلیل‌های صورت گرفته، سرعت قطار ثابت و مساوی ۳۰۰

تأثیر بار قطار در کاهش ارتعاشات بیشتر می‌شود، به طوری که با افزایش بار محوری از ۱۲ تن به ۱۷ تن، حدود ۹ دسی بل، افزایش ارتعاش در فاصله ۴۰ متری از خط ایجاد می‌گردد.

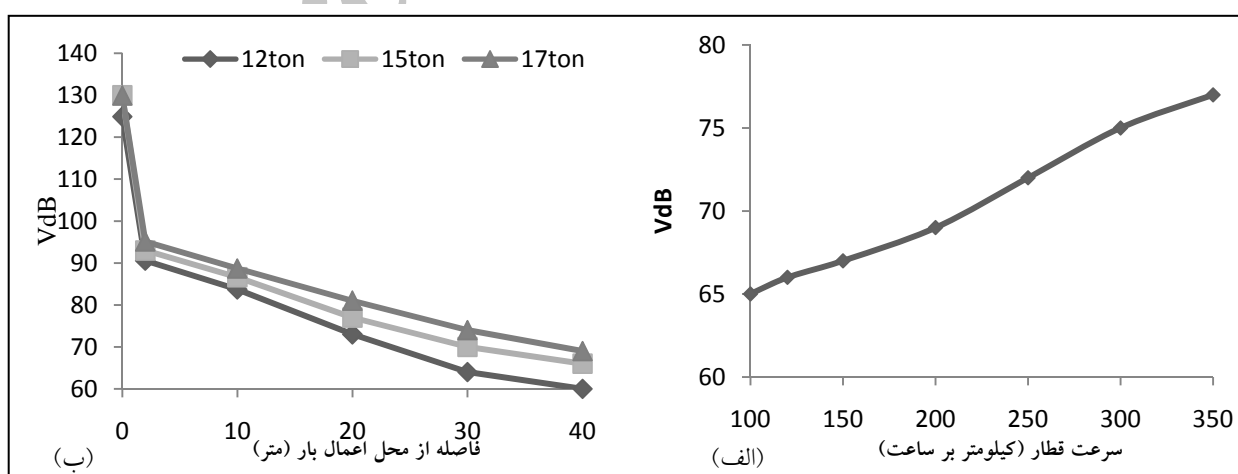
کیلومتر بر ساعت است. شیب خاکریز، مساوی ۱:۱/۵ در نظر گرفته شده و بار محوری قطار ۱۵ تن می‌باشد. همان‌طور که از شکل (۱۱-ب) مشخص است، با افزایش فاصله از خط، میزان



شکل ۹. تأثیر (الف) شیب خاکریز و (ب) عرض خاکریز در کاهش سرعت ارتعاش



شکل ۱۰. تأثیر (الف) ارتفاع خاکریز و (ب) سختی خاکریز در کاهش سرعت ارتعاش



شکل ۱۱. نحوه تغییرات ارتعاش خط با تغییر (الف) سرعت قطار (ب) بار محوری قطار

۶- نتیجه‌گیری

۶- مؤثرترین عامل کاهش‌دهنده ارتعاش، ضخامت لایه خاکریز است، به طوری که با افزایش ضخامت از صفر به حدود ۳ متر ۱۰ دسی بل کاهش در سطح ارتعاش مشاهده می‌شود. البته با افزایش ضخامت به بیش از ۳ متر اثرات آن بر کاهش سطح ارتعاش چندان قابل توجه نخواهد بود.

در مقاله حاضر، تأثیر پارامترهای مقاومتی و هندسی خاکریز بر کاهش ارتعاشات ناشی از حرکت قطار سریع‌السیر به روش عددی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، عواملی همچون مدول الاستیسیته خاکریز، ضخامت خاکریز، عرض خاکریز، شیب خاکریز، بار محوری و سرعت حرکت قطار سریع‌السیر مورد حساسیت‌سنجی قرار گرفته و تأثیر آنها بر ارتعاشات خط و نقاط اطراف آن بررسی شده است. از آنجا که استفاده از اینرسی خاکریز و مشخصات مقاومتی آن می‌تواند به عنوان عاملی بالقوه در کاهش ارتعاشات خط ریلی مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین، می‌توان نتایج به‌دست آمده از تحقیق انجام شده را به صورت زیر بیان کرد:

۱- عرض شانه خاکریز در نقاط نزدیک به خط، تأثیر زیادی در کاهش ارتعاش دارد. با افزایش فاصله از خط از تأثیر شکل هندسی خاکریز کاسته می‌شود. برای مثال، افزایش عرض خاکریز از ۴/۵ به ۸ متر، در فاصله ۳ متر از لبه خاکریز، کاهش ارتعاشی معادل ۱۴ دسی بل ایجاد می‌کند، در حالی که این کاهش ارتعاش در فاصله ۳۰ متر، ۵ دسی بل است.

۲- شیب شانه خاکریز در نزدیکی خط، تأثیر زیادی بر کاهش ارتعاشات خط دارد. حداکثر کاهش ارتعاش مشاهده شده در این حالت برابر با ۱۴ دسی بل است. با افزایش فاصله از خط تأثیر شیب خاکریز کاهش می‌یابد و حداکثر کاهش ارتعاش مشاهده در اثر تغییر شیب خاکریز، در نقاط دور از خط، حدود ۵ دسی بل است.

۳- کاهش بار محوری از ۱۷ به ۱۲ تن، در نقاط دور از خط (تحت شرایط بررسی شده)، کاهش ارتعاشی معادل با ۹ دسی بل ایجاد می‌کند.

۴- اثر تغییر سختی خاکریز (در محدوده تعریف شده) بر کاهش ارتعاشات نقاط نزدیک به خط حدود ۱۵ دسی بل است ولی با افزایش فاصله از خط، تأثیر سختی خاکریز کاهش یافته و در فاصله ۴۰ متری به ۴ دسی بل کاهش می‌یابد.

۵- با افزایش سرعت قطار میزان ارتعاشات خط افزایش یافته و روند این افزایش تقریباً خطی است. به طوری که با افزایش سرعت از ۱۰۰ به ۳۵۰، ۱۱ دسی بل افزایش در سطح ارتعاشات مشاهده می‌شود.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Interaction
2. Finite Element Method
3. Boundary Element Method
4. Half Space
5. Green Functions
6. Rayleigh Damping
7. Radiation Condition
8. Infinite Element
9. Implicit Method
10. Hertz Theory
11. Decibel
12. Federal Transit Administration

۸- مراجع

- اسماعیلی، م. و فشارکی، م. (۱۳۸۸) "بررسی تأثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی بر کاهش ارتعاشات ناشی عبور قطار"، فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره دوم، زمستان ۱۳۸۸، صص ۷۷-۶۱.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، "مشخصات فنی، عمومی روسازی راه آهن"، نشریه شماره ۳۰۱، ۱۳۸۵.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، "دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع‌السیر"، نشریه شماره ۳۹۴، ۱۳۸۶.
- Adam, M., Panzb, G., and Schmid, G. (2000) "Two- and three-dimensional modeling of half-space and train-track embankment under dynamic loading", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.19, pp. 559-573.
- Bode, C., Hirschauer, R., and Savidis, S.A., (2002) "Soil- structure interaction in the time domain using half space Green's functions", *Soil*

- Lou, P., Zhong, X. G., Tang, J. F. and Zeng, Q. V. (2006) "Finite-element analysis of discretely supported rail subjected to multiple moving concentrated forces", Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, Vol. 220, pp. 305-315.
- Kouroussis, G., Verlinden, O. and Conti, C., (2011) "Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, Issue 4, pp. 692-707.
- Krylov, V. (2001) "Generation of ground vibration boom by high-speed trains". Noise and vibration from high-speed trains, edited by V.V. Krylov, London, Thomas Telford, pp. 251-283.
- Madshus, C. and Kaynia, A.M. (2001) "High-speed trains on soft ground: Track-embankment-soil response and vibration generation". Noise and vibration From high-speed trains, edited by V.V. Krylov, Thomas Telford, London, pp. 315-344.
- Park, D. and Hashash, Y., (2004) "Soil damping formulation in nonlinear time domain site Response analysis", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 249-274.
- Sun, Y. Q., M. Dhanasekar, M., (2002) "A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system" International Journal of Solids and Structures, 39, pp. 1337-1359.
- U.S. Department of Transportation (DOT), (2005) "High-speed ground noise and vibration impact assessment", Office of Railroad Development, HMMH Report No. 293630-4.
- Wang, J. and Zeng, X., (2004) "Numerical Simulation of vibration attenuation of a high-speed train foundation with different trackbed materials". Journal of Vibration and Control, Vol. 10, No. 8, pp. 1123-1136.
- Yanga. Y. B. Hungb, H. H. and Changb D. W. (2003) "Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, pp. 263-278.
- Dynamics and Earthquake Engineering, No. 22, pp. 283-295.
- Chopra, A. K. (1995) "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. N.J.
- Degrande, G. (2001) "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, London, Thomas Telford, pp. 285-314.
- Ditzel, A. and Herman, G.C. (2003) "The influence of a rail embankment on the vibrations generated by moving trains", Journal of Sound and Vibration, No. 273, pp. 937-957.
- Eaveld, C. (2001) "Modern railway track", 2nd Edition, MRT Productions.
- Grassie, S. L., Gregory, R. W. and Johnson, K. L. (1982) "The dynamic response of railway track to high frequency longitudinal excitation" Journal Mechanical engineering Science, Vol. 24, pp. 97-102.
- Hall, L. (2002) "Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No. 23, pp. 403-413.
- Hudson, M, Idriss, I. M. and Beikae, M (1994) "User manual for QUAD4M", Center for geotechnical modeling, Department of civil and environmental Engineering, University of California.
- International Union of Railways, (1994) "UIC Code 719R: Earthworks and track-bed layers for railway lines", 2nd Edition.
- Koh. C.G., Chiew .G. H. and Lim. C.C., (2007) "A numerical method for moving load on continuum", Journal of Sound and Vibration, 300, pp. 126-138.
- Lombaert. G. and Degrande, G. (2009) "Ground-borne vibration due to static and dynamic axle loads of inter city and high-speed trains", Journal of Sound and Vibration 319, pp. 1036-1066.