

بررسی تأثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی بر کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار

مرتضی اسماعیلی؛ استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران
محمد فشارکی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

Email: m_esmaeili@iust.ac.ir

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلات بهره برداری از خطوط راه آهن درون شهری و بین شهری، ارتعاشات ناشی از عبور قطار می‌باشد. این ارتعاشات ضمن آسیب‌رساندن به زیرساخت‌های خط ریلی، باعث عدم آسایش ساکنان اطراف خط می‌گردد. به کارگیری مصالح طبیعی خاکریز در خط ریلی، علاوه بر ایجاد تکیه گاهی مناسب برای بالاست و سیستم روسازی، به عنوان یک عامل بالقوه باعث کاهش سطح ارتعاشات و میرایی آنها در محیط نیز می‌گردد. با نگاهی به مدل‌های تحلیلی ارایه شده جهت بررسی ارتعاشات ایجاد شده در خط ریلی، ملاحظه می‌گردد که در عمده مدل‌های موجود، تأثیر هر یک از اجزا و به ویژه اثر مصالح خاکی، به روشنی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در مقاله حاضر با توسعه مدلی تحلیلی، ضمن منظور نمودن شرایط دینامیکی بار ناشی از عبور قطار، علاوه بر بررسی اثرات اجزای مختلف خط، بر میزان سرعت ارتعاشات ایجاد شده، اثر خاکریز راه آهن نیز به طور ویژه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور معادلات دیفرانسیل حاکم بر شرایط دینامیکی خط، بر اساس ارتعاش جرم- فنر- میراگر، در مدل هر می توسعه یافته، تشکیل و به صورت عددی توسط برنامه *MATLAB* حل شده است. به منظور بررسی تأثیر خاکریز در مقایسه با سایر پارامترهای مؤثر در تحلیل دینامیکی خط، بر روی دامنه بار محوری و سرعت عبور قطار و همچنین ضخامت، سختی و میرایی خاکریز تحلیل حساسیت انجام شده و قابلیت بالای این مصالح در کاهش ارتعاشات، نشان داده شده است. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته، نشان‌دهنده آن است که تا ضخامت حدود ۳ متر، خاکریز راه آهن، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش ارتعاشات خط، نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: خاکریز، سختی، میرایی، ارتعاش، سرعت حداکثر

۱. مقدمه

نروژ^۲ جهت پیش‌بینی ارتعاشات با فرکانس پایین، ناشی از حرکت قطار بر روی خاک نرم، اشاره کرد. داده‌های مورد استفاده جهت این مدل پیش‌بینی ارتعاش، از اندازه‌گیرهای وسیع انجام شده در مناطق دارای خاک نرم تا سخت و ساختمان‌هایی با شرایط گوناگون فراهم گشته است [۵].

به منظور کاهش ارتعاشات منتشره از خطوط ریلی سه روش کلی جهت نیل به هدف یاد شده در ادبیات فنی ارائه گردیده است. در روش نخست ارتعاشات در منبع ایجاد ارتعاش که همان وسیله نقلیه ریلی و نقطه تماس آن با ریل می‌باشد کاهش داده می‌شوند. این موضوع در قالب اصلاح شرایط فربندی وسیله نقلیه و همچنین تغییر مشخصات دینامیکی آن قابل اعمال بوده و از طرف دیگر در سال‌های اخیر تلاش‌های قابل توجهی درخصوص اصلاح پروفیل چرخ و به‌کارگیری مصالح خاص در چرخ که بتوانند سطح ارتعاشات را تا حد قابل قبولی کاهش دهند، صورت گرفته است. در بخش دوم ارتعاشات در مسیر انتقال که شامل خط و محیط اطراف آن می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. عمده روش‌های کاهش ارتعاش در خط به استفاده از ادوات اتصال مناسب میان ریل و تراورس (پابند و پد زیر ریل) و یا لایه‌های خاص میراکننده انرژی مانند پتوی بالاست^۳ و یا پدهای جاذب ارتعاش زیر تراورس^۴ مربوط می‌گردد. در عین حال درخصوص کاهش انتشار امواج سطحی (امواج رایله) منتقل شده از خط به محیط اطراف نیز می‌توان از وجود ترانشه‌های کناری^۵ که با مصالح دانه‌ای پر شده‌اند نیز می‌توان بهره برد. دسته سوم روش‌های کاهش ارتعاشات خط ریلی به انجام تغییرات در محل دریافت‌کننده ارتعاشات مربوط می‌شود. به عنوان نمونه نصب سیستم‌های فنر-میراگر در پی ساختمان‌های ویژه را می‌توان از جمله این تمهیدات به شمار آورد [۵ و ۶]. در بین روش‌های ارائه شده جهت کاهش ارتعاشات توسط خود خط ریلی، استفاده از مصالح خاکریز به‌عنوان یک عامل بالقوه، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به عبارت دیگر اینرسی قابل ملاحظه موجود در مصالح خاکریز و افزایش قابل توجه آن با ارتفاع از یک طرف و خصوصیات میرایی این مصالح از طرف دیگر می‌تواند به‌طور

افزایش تقاضای نقل و انتقال بار و مسافر در سال‌های اخیر، سبب توجه روزافزون کشورها به صنعت حمل‌ونقل ریلی به‌عنوان سیستمی ایمن، ارزان و سازگار با محیط زیست گردیده است. از طرفی با ظهور قطارهای سریع درون‌شهری و خطوط سریع‌السير بین‌شهری، تحول عظیمی در حمل‌ونقل ریلی به‌وجود آمده است. با وجود بهبود قابل ملاحظه‌ای که خطوط راه‌آهن در سیستم حمل‌ونقل پدید آورده‌اند، همزمان نگرانی‌هایی در مورد ایجاد صدا و ارتعاش، در مناطق شهری و حاشیه شهرها وجود دارد. افزایش میزان ارتعاشات خطوط راه‌آهن، علاوه بر آسیب اجزای خط و ابنیه فنی، سبب آزدگی ساکنان اطراف خط می‌گردد. با افزایش سرعت قطارها، سطح ارتعاشات انتقال یافته به سازه‌های حاشیه خط افزایش یافته است. در این بین، سرعت قطارها گاهی از سرعت انتشار امواج در خاک نیز بیشتر شده و منجر به افزایش شدید سطح ارتعاش می‌گردد. ظهور چنین مواردی مشکلات زیادی در بهره‌برداری از قطارهای سریع‌السير ایجاد نموده، به‌طوری‌که در مواردی منجر به تقلیل سرعت قطارها گردیده است [۱].

با مروری بر ادبیات فنی موجود در بحث ارتعاشات خطوط ریلی، مشخص می‌گردد که این مساله همواره از دو منظر مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش اول، توسعه مدل‌های تحلیلی که بتوانند میزان ارتعاشات ایجاد شده در خط و اجزای آن را پیش‌بینی نمایند مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش می‌توان به کارهای انجام شده توسط Krylov [۲ و ۳] و Degrande [۴] اشاره کرد. از سوی دیگر با مشخص شدن سطح ارتعاشات در خط و مناطق اطراف آن، ارزیابی میزان کارایی تدابیر به‌کار رفته جهت کاهش سطح ارتعاشات خط راه‌آهن در منبع، مسیر و دریافت‌کننده ارتعاش، موضوع تحقیقات دیگری در این زمینه بوده است. در این میان می‌توان به کارهای صورت گرفته توسط اداره حمل‌ونقل فدرال آمریکا^۱ [۵] اشاره نمود که منجر به ارائه مدلی جهت پیش‌بینی ارتعاش و تاثیر عوامل مختلف در خط، مسیر و دریافت‌کننده ارتعاش گردیده است. از دیگر مطالعات صورت گرفته در این راستا می‌توان به مدل نیمه‌تجربی مؤسسه ژئوتکنیک

خط، حل شده است. در این زمینه می توان به تحقیقات صورت گرفته توسط Grassi و همکاران [۸] و Lou and Zeng [۹] و [۱۰] اشاره کرد. از آنجا که در مقاله حاضر، تمرکز بر مشخصات اجزای خط ریلی است، تنها معادلات حاکم بر اجزای خط اعم از روسازه و زیرسازه، شامل خاکریز و بستر نوشته شده و معادلات در قالب یک سیستم ۵ درجه آزادی مطابق شکل ۱ توسعه داده شده است. شکل کلی معادلات مذکور، به فرم معادلات تعادل دینامیکی به صورت رابطه (۱) است.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\}$$

که در آن $[m]$ ، $[c]$ و $[k]$ به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی می باشند. از آنجا که سیستم مورد نظر گسسته می باشد، لذا ماتریس جرم قطری است و نیروی دینامیکی قطار تنها بر ریل (جرم اول) وارد می شود. ضریب سختی K_{ij} (ضریب میرایی C_{ij}) به صورت نیروی متناظر با درجه آزادی j ، به ازای تغییر مکان واحد (سرعت واحد) در درجه آزادی j ، وقتی تغییر مکان (سرعت) در سایر درجات آزادی برابر صفر است، تعریف می شود. بنابراین بسط یافته معادله (۱) را می توان به صورت معادله (۲) در نظر گرفت.

خاص سبب کاهش ارتعاشات انتقال یافته به اطراف خط گردد. در مقاله حاضر با توسعه مدل هر می ارایه شده توسط Ahlbeck و همکاران [۷]، برای شرایط دینامیکی اعمال بار ناشی از عبور قطار، ضمن مشخص نمودن اثر اجزای مختلف خط بر کاهش ارتعاشات، اثر خاکریز راه آهن نیز به طور ویژه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، خط به صورت یک سیستم ۵ درجه آزادی مرکب از ریل، تراورس، بالاست، بستر خاکریز و بدنه باربر خاکریز مدلسازی شده و تحت تاثیر ارتعاش اجباری ناشی از بار قطار قرار گرفته است. در ادامه معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم جرم- فنر- میراگر یادشده توسط برنامه MATLAB حل شده است. روش حل ارایه شده امکان تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر ارتعاشات خط ریلی و محدوده تاثیر آنها در خطوط مختلف ریلی، اعم از باری، مسافری و سریع السیر را فراهم نموده است.

۲. بیان معادلات حاکم بر ارتعاش سیستم

در عمده تحقیقات انجام شده در تحلیل دینامیکی خط ریلی، معمولاً اندرکنش خط و قطار به صورت یک مجموعه واحد مد نظر قرار گرفته و معادلات تعادل حاکم بر سیستم وسیله نقلیه-

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \\ \ddot{u}_4 \\ \ddot{u}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & (c_1+c_2) & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & (c_2+c_3) & -c_3 & 0 \\ 0 & 0 & -c_3 & (c_3+c_4) & -c_4 \\ 0 & 0 & 0 & -c_4 & (c_4+c_5) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \dot{u}_3 \\ \dot{u}_4 \\ \dot{u}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & (k_1+k_2) & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & (k_2+k_3) & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & (k_3+k_4) & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & -k_4 & (k_4+k_5) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

۳. مشخصات بارگذاری ناشی از حرکت قطار

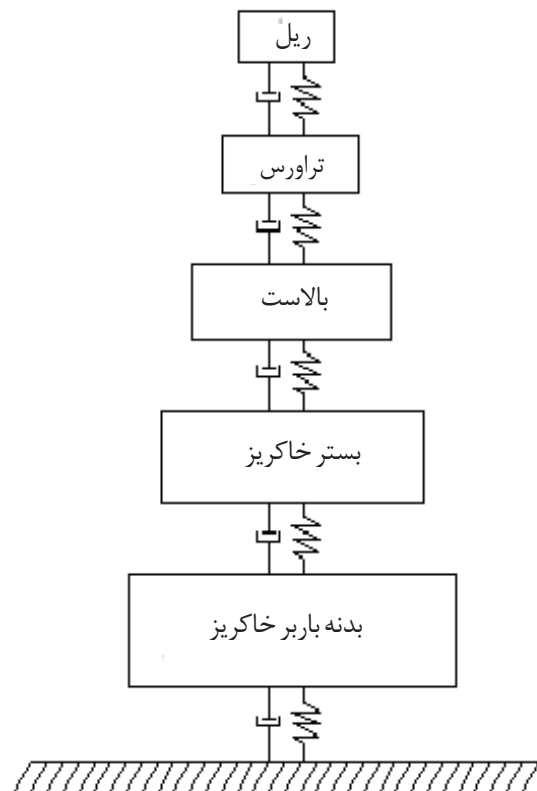
در شرایط واقعی، بار قطار از طریق سطح تماس چرخ و ریل بر خط اعمال می‌گردد. در این راستا استفاده از تئوری هرتز^۶ امکان تعریف بارگذاری به صورت سطوح گسسته را در محل هر چرخ فراهم می‌آورد. [۱۲] با توجه به عدم همگرایی حل مدل تحلیلی در شرایط استفاده از بار ضربه‌ای تولید شده، معمولاً از شکل هارمونیک بار که توسط تبدیل فوریه قابل استخراج می‌باشد، استفاده می‌گردد. این مساله باعث می‌شود که امکان انتخاب گام‌های زمانی بسیار کوچک و بالا بردن دقت حل و یا گام زمانی بزرگ و کاهش زمان حل فراهم گردد. مهم‌ترین گام در تعریف بارگذاری هارمونیک، تعیین فرکانس مناسب بار است. به عبارت دیگر صحت بارگذاری توسط فرکانس آن، که نشان‌دهنده سرعت بارگذاری است، کنترل می‌شود. در تحقیق حاضر، برای تعیین فرکانس غالب، از تبدیل سریع فوریه^۷ استفاده شده است. تبدیل سریع فوریه یک روند محاسباتی مناسب و مؤثر برای روش تبدیل انفصالی فوریه است. با استفاده از تبدیل فوریه می‌توان حل مساله با بارگذاری غیرتناوبی را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل نمود. در نتیجه با در نظر گرفتن فرکانس‌های غالب، بارگذاری ساده شده و مساله نیز ساده‌تر حل می‌شود.

بارگذاری حاصل از عبور قطار، پیچیده و دارای فرکانس‌های متعددی است. به‌طور نمونه، شکل ۲ نمایی از قطار سریع‌السیر Thalys و فاصله بین محورهای آن را نشان می‌دهد. شکل ۳-الف، تغییر شکل ایجاد شده در ریل (جرم یک) و طیف تغییر شکل مربوط به آن را در شرایط حرکت قطار با سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت، نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳-الف می‌توان فرکانس‌های غالب ناشی از عبور قطار فوق را تعیین کرد. با گرفتن تبدیل سریع فوریه مطابق شکل ۳-ب، فرکانس اصلی سیستم بارگذاری قطار، حدود ۲/۸۵ هرتز به‌دست می‌آید که بسیار نزدیک به فرکانس عبور بوژی^۸ واگن‌ها یا ۲/۹۷ است. فرکانس اصلی دیگر ۱۷/۳ هرتز می‌باشد که معادل فرکانس عبور محور یا ۱۸/۵ هرتز است. فرکانس عبور بوژی و محور، در نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی نیز به‌دست آمده است.

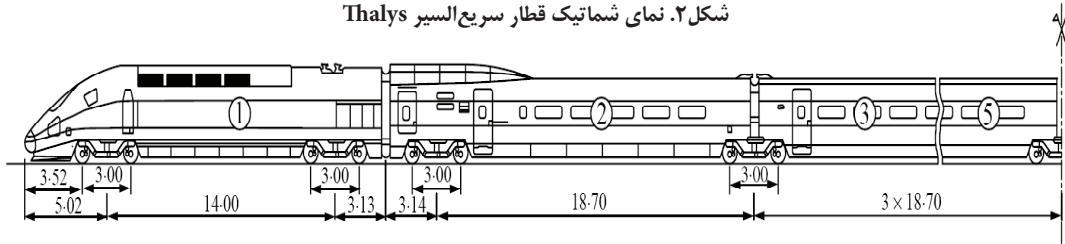
که در آن m_1, m_2, m_3, m_4 و m_5 به ترتیب جرم ریل، تراورس، بالاست، بستر خاکریز و بدنه باربر خاکریز می‌باشد. همچنین C_1, C_2, C_3, C_4 و C_5 به ترتیب مقادیر میرایی لایه‌های پد، تراورس، بالاست، بستر خاکریز، بدنه باربر خاکریز و خاک طبیعی بوده و k_1, k_2, k_3, k_4 و k_5 به ترتیب معرف سختی لایه‌های پد، تراورس، بالاست، بستر خاکریز، بدنه باربر خاکریز و خاک طبیعی است.

در این بررسی، جرم‌های ریل، تراورس، بالاست و خاکریز که خود شامل دو لایه بستر خاکریز خاکریز و بدنه باربر خاکریز است به‌طور مجزا در نظر گرفته شده است. علت تفکیک لایه بستر خاکریز از بدنه باربر خاکریز، خصوصیات متفاوت این دو لایه است که در آیین‌نامه UIC به آن اشاره شده است [۱۱].



شکل ۱. مدل جرم-فنر مقطع عرضی خط

شکل ۲. نمای شماتیک قطار سریع السیر Thalys



بار (معادل فرکانس عبور بوژی) و t زمان می باشد. در حل معادلات این فرکانس برای انواع قطارهای باری، مسافری و سریع السیر در سرعت های مختلف محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است.

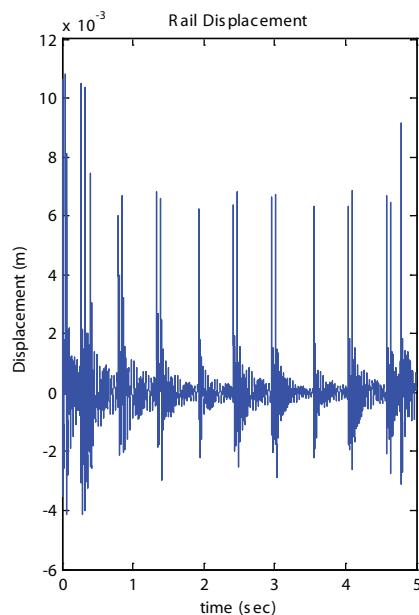
۴. توسعه مدل هرمی برای خط ریلی متکی بر خاکریز

یکی از مدل های تحلیلی که برای بررسی توزیع بار اعمالی بر بالاست زیر تراورس و برای شرایط استاتیکی توسعه داده شده است، مدل ارایه شده Ahlbeck و همکاران [۷] است که به مدل هرمی بالاست^۴ موسوم می باشد. در این روش، فرض می شود که بار انتقال یافته از تراورس ها به بالاست به صورت هرمی توزیع می گردد. همچنین فرض می گردد تنش ها در داخل هرم به صورت

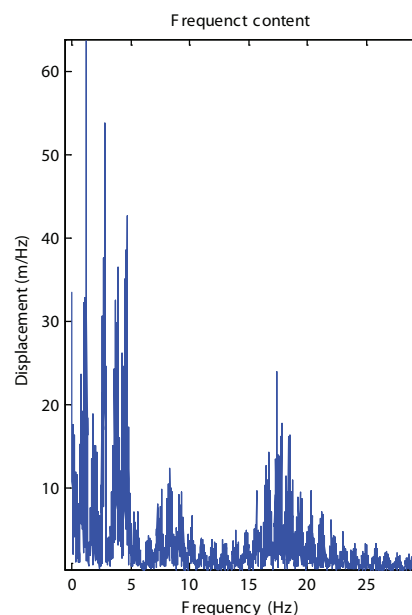
برای مثال Degrande [۴] و Galvin and Dominguez [۱۳] فرکانس عبور بوژی و فرکانس عبور محورها را به عنوان فرکانس های اصلی سیستم، در اندازه گیری های میدانی انجام شده به دست آورده اند. این نتایج در سایر اندازه گیری های میدانی نیز تأیید شده است. بنابراین در ادامه برای توسعه و حل معادلات حاکم بر سیستم جرم-فنر-میراگر از رابطه هارمونیک ایده آل زیر استفاده می شود که با به کار بردن آن، نیرویی مثبت و با فرکانس عبور بوژی بر سیستم خط اعمال می شود.

$$F = P(1 - \cos 2\pi ft) \quad (۳)$$

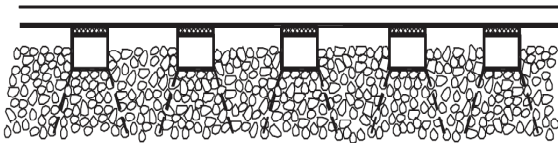
در رابطه فوق P ، یک چهارم بار محوری، f ، فرکانس اعمال



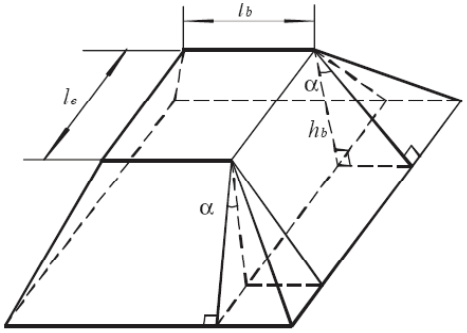
ب. طیف تغییر شکل ریل



شکل ۳. الف. تغییر شکل های ایجاد شده در ریل

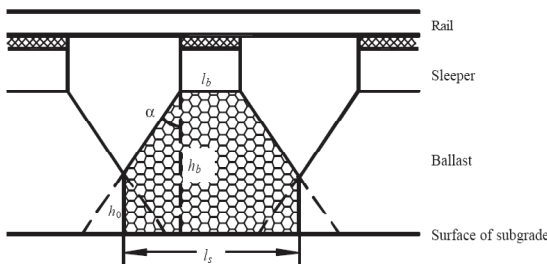


شکل ۴. توزیع بار در مصالح دانه ای بالاست



شکل ۵. شکل سه بعدی ناحیه مؤثر بالاست در ارتعاش

همان‌طورکه از شکل ۴ مشخص می‌باشد، روابط فوق بر اساس این فرض توسعه یافته که همپوشانی بین هرم‌های مجاور وجود نداشته باشد. در حالتی که ضخامت لایه بالاست زیاد، یا فاصله بین تراورس‌ها کم باشد و یا زاویه توزیع تنش در بالاست زیاد باشد، همپوشانی بین جرم‌های مجاور بالاست اتفاق می‌افتد (شکل ۶). بنابراین در این مورد لازم است روابط مربوط به سختی و جرم بالاست، اصلاح شود [۱۴]. در این حالت، جرم مؤثر بالاست را می‌توان به صورت ناحیه هاشور خورده در شکل ۶ نشان داد.



شکل ۶. مدل اصلاح شده بالاست

در این مدل، ارتفاع ناحیه همپوشانی دو مخروط توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

یکنواخت توزیع شده و خارج از آن مقدار تنش‌ها مساوی صفر است. زاویه توزیع تنش در هرم، به ضریب پواسون بستگی دارد. بنابراین ناحیه مؤثر بالاست، در زیر هر تراورس را می‌توان توسط شکل ۴ نشان داد. شکل ۵ قسمتی از بالاست که تحت تاثیر بار اعمالی از قطار قرار دارد را در حالت سه بعدی نشان می‌دهد. بر این اساس، جرم قسمتی از بالاست که در باریبری مشارکت دارد از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$M_b = \rho_b h_b \left[l_e l_b + (l_e + l_b) h_b \tan(\alpha) + \frac{4}{3} h_b^2 \tan^2 \alpha \right] \quad (4)$$

در این رابطه ρ_b چگالی بالاست، h_b ضخامت بالاست، l_e طول مؤثر ناحیه اتکایی نصف تراورس، l_b عرض تراورس و α زاویه توزیع تنش در بالاست می‌باشد. اگر سطح تماس مؤثر تراورس با بالاست توسط l_e و l_b مشخص شود، سختی لایه بالاست از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_b = \frac{2(l_e - l_b) \tan \alpha}{\ln \left[\left(\frac{l_e}{l_b} \right) (l_b + 2 h_b \tan \alpha) / (l_e + 2 h_b \tan \alpha) \right]} E_b \quad (5)$$

در رابطه فوق E_b مدول الاستیک بالاست می‌باشد. سختی بستر خاکریز در زیر ناحیه هرمی شکل نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_f = (l_e + 2 h_b \tan \alpha) (l_b + 2 h_b \tan \alpha) E_f \quad (6)$$

در این رابطه E_f مدول بستر زمین است که مقدار آن را می‌توان بر اساس K_{30} یا مدول عکس‌العمل بستر به دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه (روی صفحه‌ای دایره‌ای به قطر ۳۰ سانتی‌متر) محاسبه نمود.

بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی ...

است:

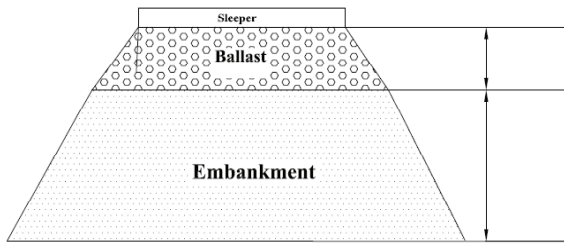
$$(11) \quad h_0 = h_b - \frac{l_s - l_b}{2 \tan \alpha} \quad (7)$$

$$M_{em} = \rho_{em} l_s h_{em} (l_e + 2h_b \tan \alpha_b + h_{em} \tan \alpha_{em})$$

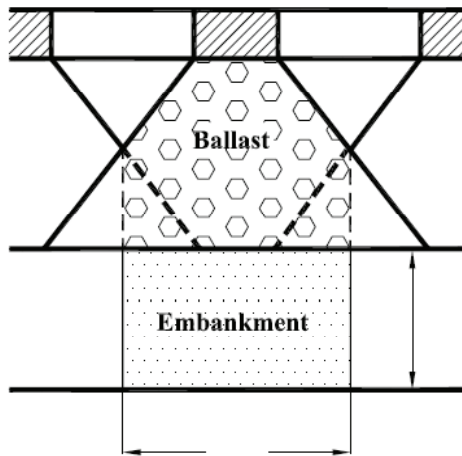
(12)

$$K_{em} = \frac{2E_{em} l_s \tan \alpha_{em}}{\ln \left[1 + \frac{2h_{em} \tan \alpha_{em}}{l_e + 2h_b \tan \alpha_b} \right]}$$

بنابراین در شرایط حاضر، مقادیر جرم و سختی برای اجزای مختلف خط ریلی، قابل تعیین بوده و به راحتی در معادلات



الف) نمای طولی



ب) نمای عرضی

شکل ۷. نحوه توزیع تنش در خاکریز

که l_s فاصله بین تراورس ها می باشد.

بنابراین جرم ارتعاشی بالاست نیز طبق رابطه زیر به دست می آید:

$$(8) \quad M'_b = \rho_b \left[l_b h_b + (l_e + h_b \tan \alpha) + l_e (h_b^2 - h_0^2) \tan(\alpha) + \frac{4}{3} (h_b^3 + h_0^3) \tan \alpha \right]$$

سختی ناحیه بالاست نیز از ترکیب سری دو ناحیه تشکیل شده بر اساس روابط زیر تعیین می گردد:

(9)

$$K'_b = \frac{K_{b1} K_{b2}}{K_{b1} + K_{b2}}$$

$$K_{b1} = \frac{2(l_e l_b) \tan \alpha}{\ln \left[\frac{(l_e l_s)}{(l_b (l_e + l_s - l_b))} \right]} E_b$$

$$K_{b2} = \frac{l_s (l_s - l_b + 2l_e + 2h_b \tan \alpha) \tan \alpha}{l_b - l_s + 2h_b \tan \alpha}$$

و سختی بستر خاکریز نیز به صورت زیر تغییر می کند:

$$(10) \quad E'_f = l_s (l_e + 2h_b \tan \alpha) E_f$$

در مقاله حاضر با توجه به اصول حاکم بر مدل هرمی در شرایطی که توزیع تنش در بالاست دارای هم پوشانی است، این مدل برای شرایطی که خط ریلی متکی بر خاکریز است، توسعه داده شده است. هدف از این کار، استخراج مقادیر جرم و سختی برای اجزای خط ریلی می باشد که در معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم جرم-فنر-میراگر مورد استفاده قرار خواهند گرفت. نحوه توزیع تنش برای چنین حالتی در شکل ۷ در جهت طولی و عرضی خط نشان داده شده است.

عملاً بر اساس چنین فرضیاتی معادلات حاکم برای جرم و سختی خاکریز به صورت روابط (11) و (12) قابل استخراج

ارتعاشی سیستم قابل به کارگیری خواهد بود.

حاکم بر جرم، سختی و میرایی اجزا، در قالب انجام تحلیل حساسیت، توسط برنامه MATLAB، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵. انتخاب پارامترهای جرم - سختی - میرایی خط

برای تحلیل دینامیکی

با نگاهی به ادبیات فنی ارتعاش در خط ریلی در انواع مدل‌های تحلیلی خط، محدوده مختلفی برای پارامترهای میرایی و سختی اجزا، ارایه شده است. محققان متعددی با در نظر گرفتن تعداد جرم‌های متفاوت در مدلسازی خط راه‌آهن، این مقادیر را ارایه نموده‌اند. از آن جمله می‌توان به مدل‌های ارایه شده توسط Grassie و همکاران [۸] که از یک یا دو جرم استفاده شده است و مدل سه‌جرمی Zai و همکاران [۱۴] که در آن قفل و بست ذرات بالاست با یکدیگر نیز منظور شده است، اشاره کرد.

همچنین محققان دیگری، مدل‌هایی با ۴ و ۵ جرم نیز ارایه نموده‌اند که از مجموعه این مطالعات می‌توان محدوده تغییرات سختی و میرایی اجزای خط را تعیین کرد. [۱۵ و ۱۶ و ۱۷]. از آنجاکه در تحقیق حاضر از فرم توسعه داده شده مدل هرمی استفاده خواهد شد، لذا لازم است مقادیر انتخابی برای پارامترهای مختلف جرم، سختی و میرایی مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به معادلات (۷) تا (۱۲) مقادیر جرم و سختی بر اساس شرایط هندسی و مدول الاستیسیته اجزای خط قابل استخراج خواهند بود. لازم به ذکر است که مقادیر مدول الاستیسیته برای لایه خاکریز بر اساس توصیه‌های UIC۷۱۹ [۱۱] و Madshus و همکاران [۱] انتخاب شده است. اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن‌ها، مقادیر حداقل سختی لایه بدنه باربر خاکریز و بستر خاکریز را ارایه کرده است. این مقادیر در نشریه شماره ۳۹۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، تحت عنوان «دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن سریع‌السیر» نیز تکرار گردیده است [۱۸]. جدول ۱ پارامترها و محدوده آنها را جهت استفاده در تحلیل دینامیکی خط، در بخش بعد نشان می‌دهد.

با معلوم شدن مقادیر جرم، سختی و میرایی، از یک طرف و از طرف دیگر، شرایط بار هارمونیک قابل اعمال بر خط، امکان حل معادلات حاکم بر ارتعاش خط، فراهم می‌گردد. نتایج حل، برای شرایط مختلف

۶. نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اجزای مختلف خط

در این بخش بر اساس محدوده مشخص شده برای هر پارامتر، تاثیر تغییرات آن، در محدوده مشخص شده بر سرعت ارتعاشات اجزای خط مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجا که امکان تغییر همزمان همه پارامترها باهم وجود ندارد، حین تغییر یک پارامتر سایر پارامترها به‌عنوان مقدار متوسط در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه نتایج تحلیل عددی انجام شده ارایه می‌گردد. بجز در مواردی که در متن مقاله عنوان شده است، در تمامی تحلیل‌های انجام شده، از قطار سریع‌السیر Thalys (شکل ۲)، با بار محوری ۱۵ تن استفاده شده است. همچنین برای تعیین تاثیر سرعت قطار بر سرعت ارتعاشات خط، اثر میرایی و سختی اجزای خط برای سرعت‌های ۱۲۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. در بررسی اثر ضخامت بالاست و سختی و میرایی پد و بالاست، ضخامت خاکریز مساوی با صفر در نظر گرفته شده است. وجود لایه خاکریز تاثیر پارامترهای فوق را کاهش می‌دهد. سایر مقادیر مساوی با مقدار متوسط به‌دست آمده از جدول ۱ در نظر گرفته شده‌اند.

۶-۱ اثر میرایی و سختی پد

شکل ۸ تاثیر میرایی پد را در کاهش سرعت لایه‌های ریل و بالاست نشان می‌دهد. در بررسی صورت گرفته، ضخامت بالاست ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و سرعت قطار مورد استفاده، ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است. مقادیر سختی و میرایی سایر اجزای خط نیز ثابت و مطابق مقادیر جدول ۲ انتخاب شده‌اند.

با توجه به نتایج ارایه شده در شکل ۳، تاثیر پارامتر میرایی پد، بسیار محدود است. به عبارت دیگر حداکثر درصد کاهش سرعت مشاهده شده، ۰/۶۴ درصد است. تاثیر میرایی پد با اضافه کردن جرم خاکریز از این مقدار نیز کمتر می‌گردد. با افزایش سرعت

بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی بر...

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در تحلیل دینامیکی خط [۸] و [۱۵] و [۱۶] و [۱۷]

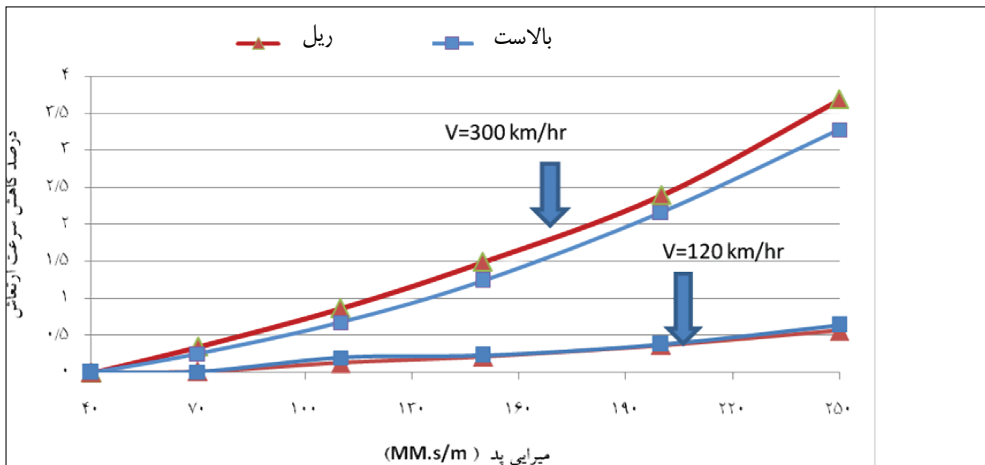
علامت اختصاری	پارامتر	مقدار	واحد
M_r	جرم واحد طول ریل	۶۰	Kg/m
M_s	جرم تراورس	۳۰۰	Kg
K_p	سختی ریل پد	۶۰-۲۴۰	MN/m
C_p	میرایی ریل پد	۴۰-۲۵۰	kNs/m
h_b	ضخامت بالاست	۰,۳-۰,۶	m
E_b	مدول الاستیسته بالاست	۱۰۰-۱۵۰	MPa
C_b	میرایی بالاست	۵۰-۲۰۰	kNs/m
E_f	مدول الاستیسته بستر خاکریز	۶۰-۱۰۰	MPa
C_f	میرایی بستر خاکریز	۳۰-۱۰۰	kNs/m
E_e	مدول الاستیسته بدنه باربر خاکریز	۴۰-۶۵	MPa
C_e	میرایی بدنه باربر خاکریز	۳۰-۱۰۰	kNs/m

جدول ۲. مقادیر پارامترهای استفاده شده در بررسی تاثیر میرایی پد در سرعت ارتعاش خط

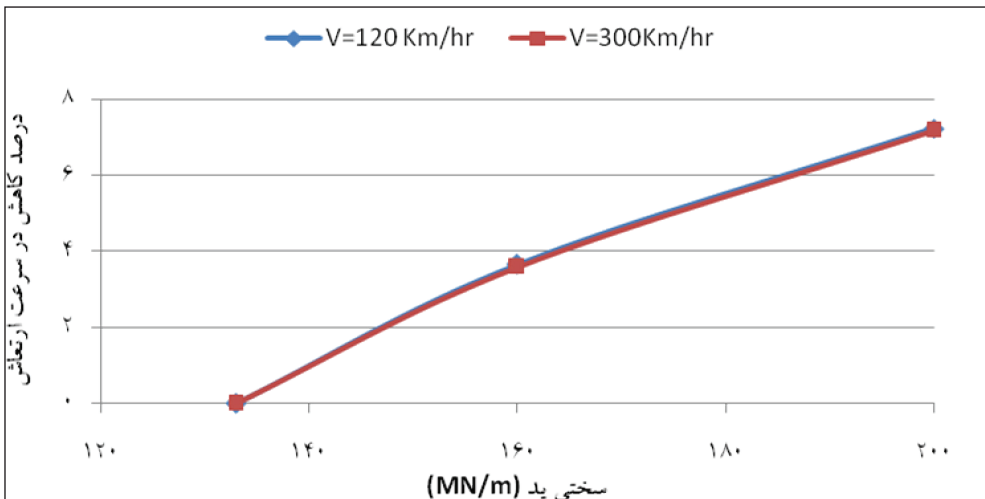
پارامتر	مقدار	واحد
جرم ریل	۶۰	کیلوگرم
جرم نصف تراورس	۱۵۰	کیلوگرم
جرم بالاست	۴۴۰	کیلوگرم
میرایی پد	۴۰-۲۵۰	kN.sec/m
میرایی بالاست	۱۲۵	kN.sec/m
میرایی بستر خاکریز	۶۵	kN.sec/m
زاویه توزیع تنش در بالاست	۳۵	درجه
مدول الاستیسته بالاست	1.1×10^8	Pa
سختی پد	6.5×10^7	N/m

نزدیک سطح قابل توجه است، به طوری که در حداکثر سختی در نظر گرفته شده، سرعت جرم اول (ریل) ۳۵ درصد کاهش می یابد. در لایه های زیرین خط، میزان تاثیر سختی پد، به شدت کاهش می یابد و حداکثر درصد کاهش سرعت بالاست در حدود ۰/۰۳

قطار به ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، میزان تاثیر میرایی پد در کاهش ارتعاشات، افزایش می یابد و حداکثر درصد کاهش معادل با ۳/۶۹ درصد مشاهده می شود. افزایش سختی پد باعث کاهش سرعت ارتعاشات اجزای خط می شود. این کاهش برای جرم های



شکل ۸. تاثیر میرایی پد در کاهش سرعت ارتعاشات ریل و بالاست



شکل ۹. تاثیر سختی پد در کاهش سرعت ارتعاشات ریل

درصد است. با افزایش سرعت، همین روند قابل مشاهده است و همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، درصد کاهش سرعت ارتعاش در اثر افزایش سختی پد تغییر چندانی پیدا نمی‌کند.

۰/۱ درصد است. با افزایش سرعت قطار از ۱۲۰ به ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، نیز تغییری در نتایج به دست نمی‌آید.

جدول ۴ تاثیر مقادیر مختلف سختی بالاست را در کاهش سرعت ارتعاشات خط، برای قطاری با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت نشان می‌دهد. با افزایش مدول الاستیسیته بالاست از ۱۰۰ به ۱۵۰ مگا پاسکال، سرعت ارتعاش ریل، کاهش می‌یابد و حداکثر کاهش سرعت مشاهده شده، ۷/۲۵ درصد است. با این حال، سرعت ارتعاش لایه بالاست افزایش می‌یابد. این افزایش در مقایسه با کاهش سرعت ارتعاش ریل، بسیار ناچیز است. تقریباً همین نتایج با افزایش سرعت از ۱۲۰ به ۳۰۰ کیلومتر بر

۲-۶ تاثیر بالاست در کاهش سرعت ارتعاشات خط

۱-۲-۶ اثر میرایی و سختی بالاست

جدول ۳ تاثیر مقادیر مختلف میرایی بالاست را در سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر به دست آمده، میرایی بالاست تاثیر محسوسی در کاهش سرعت در لایه‌های بالا و پائین خط ندارد و حداکثر کاهش سرعت به دست آمده، کمتر از

۲-۶ تاثیر بالاست در کاهش سرعت ارتعاشات خط

۱-۲-۶ اثر میرایی و سختی بالاست

۷۰

مهندسی حمل و نقل / سال اول / شماره دوم / زمستان ۱۳۸۸

بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی بر...

ساعت نیز مشاهده می شود. ترتیب حدود ۲۲ و ۶۳ درصد است. همچنین افزایش سرعت قطار

تاثیری بر روند تغییر سرعت ارتعاشات ریل و بالاست ندارد.

در نتایج به دست آمده، فرضیات حل، مشابه تحلیل های قبل است.

۶-۲-۲ اثر ضخامت بالاست

با افزایش ضخامت بالاست، جرم آن افزایش یافته و در نتیجه،

سرعت ارتعاشات لایه های مختلف خط کاهش می یابد. در این

راستا، کاهش سرعت ایجاد شده بخصوص در لایه بالاست،

قابل ملاحظه می باشد. با افزایش ضخامت بالاست از ۳۰ به ۶۰

سانتی متر، حداکثر کاهش سرعت در لایه های ریل و بالاست به

۶-۳-۳ تاثیر خاکریز در کاهش سرعت ارتعاشات خط

۶-۳-۱ اثر میرایی و سختی خاکریز

میزان تاثیر میرایی لایه های بدنه باربر خاکریز و بستر خاکریز

بسیار کم است. با توجه به تراکم بالای این لایه ها، میزان تغییرات

جدول ۳. تاثیر مقادیر مختلف میرایی بالاست در کاهش سرعت ارتعاشات خط برای سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

میرایی بالاست (kN.s/m)	جرم	سرعت ارتعاشی حداکثر (m/s)	درصد کاهش
۵۰	ریل	+۸۴۵۸۹	-
	بلاست	+۲۸۵۴۵	-
۱۰۰	ریل	+۸۴۵۲۹	+۰.۷۰۳۰
	بلاست	+۲۸۵۳۹	+۰.۲۳۴۱
۱۵۰	ریل	+۸۴۵۴۴	+۰.۵۳۰۶
	بلاست	+۲۸۵۴۰	+۰.۲۰۴۹
۲۰۰	ریل	+۸۴۵۷۵	+۰.۱۶۶۵
	بلاست	+۲۸۵۴۳	+۰.۰۷۰۴

جدول ۴. تاثیر مقادیر مختلف سختی بالاست در کاهش سرعت ارتعاشات خط برای سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

مدول الاستیسیته بالاست (MPa)	سختی بالاست (MN/m)	جرم	سرعت ارتعاشی حداکثر (m/s)	درصد کاهش
۱۰۰	۱۳۳	ریل	+۸۶۳۶۲	-
		بلاست	+۲۸۵۴۰	-
۱۲۰	۱۶۰	ریل	+۸۳۱۹۰	۳/۶۷۳۲۳
		بلاست	+۲۸۵۴۷	-۰/۰.۲۳۴۸
۱۵۰	۲۰۰	ریل	+۸۰۰۹۹	۷/۲۵۲۴۹
		بلاست	+۲۸۵۴۹	-۰/۰.۳۱۹۱

میرایی لایه‌های خاکی بستر راه‌آهن محدود می‌باشد. برای نمونه جدول ۵ نشان می‌دهد که برای قطار با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، حداکثر میزان کاهش سرعت، تحت تاثیر میرایی لایه خاکریز، حدود ۱/۲۷ درصد است. برای به‌دست آوردن این نتایج، ضخامت لایه‌های بستر خاکریز و بدنه باربر خاکریز به ترتیب ۲ و ۱ متر در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای سختی و میرایی سایر اجزای خط مطابق حالت قبل در نظر گرفته شده است. با افزایش سرعت از ۱۲۰ به ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، تاثیر میرایی خاکریز در کاهش سرعت ارتعاشات خط افزایش می‌یابد و حداکثر کاهش سرعت در بستر خاکریز در اثر افزایش میرایی از

۳۰ kN.s/m به $\frac{KN \cdot sec}{m}$ ۱۰۰ به ۷/۶ درصد می‌رسد. همچنین با افزایش مدول الاستیسیته خاکریز، سرعت ارتعاشات جرم‌های مختلف خط، کاهش می‌یابد. بیشترین تاثیر سختی بستر خاکریز، بر بالاست و بستر خاکریز می‌باشد به طوری که با افزایش مدول خاکریز، حداکثر کاهش سرعت ارتعاش معادل با ۳۶ درصد به‌دست می‌آید. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تاثیر افزایش سرعت در تغییرات نسبی ارتعاشات خط چندان محسوس نیست.

شکل ۱۰، تاثیر افزایش مدول الاستیسیته خاکریز در کاهش سرعت در لایه‌های ریل و بستر خاکریز را نشان می‌دهد.

جدول ۵. تاثیر میرایی خاکریز در میزان سرعت ارتعاشات خط برای سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

میرایی خاکریز (kN.s/m)	جرم	سرعت حداکثر (m/s)	درصد کاهش
۳۰	ریل	۲/۲۶۶۶۹	-
	بالاست	۲/۰۵۴۳۵	-
	بستر خاکریز	۱/۷۴۸۱۷	-
	بدنه باربر خاکریز	۰/۲۱۹۴۳	-
۵۰	ریل	۲/۲۵۹۰۴	۰/۳۳۷۵۷
	بالاست	۲/۰۴۶۹۲	۰/۳۶۱۹۰
	بستر خاکریز	۱/۷۴۱۶۵	۰/۳۷۲۹۲
	بدنه باربر خاکریز	۰/۲۱۸۷۳	۰/۳۱۷۶۹
۱۰۰	ریل	۲/۲۳۷۸۳	۱/۲۷۳۳۱
	بالاست	۲/۰۲۸۷۶	۱/۲۴۵۹۳
	بستر خاکریز	۱/۷۲۵۹۵	۱/۲۷۱۰۷
	بدنه باربر خاکریز	۰/۲۱۷۰۹	۱/۰۶۶۳۸

بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی ...

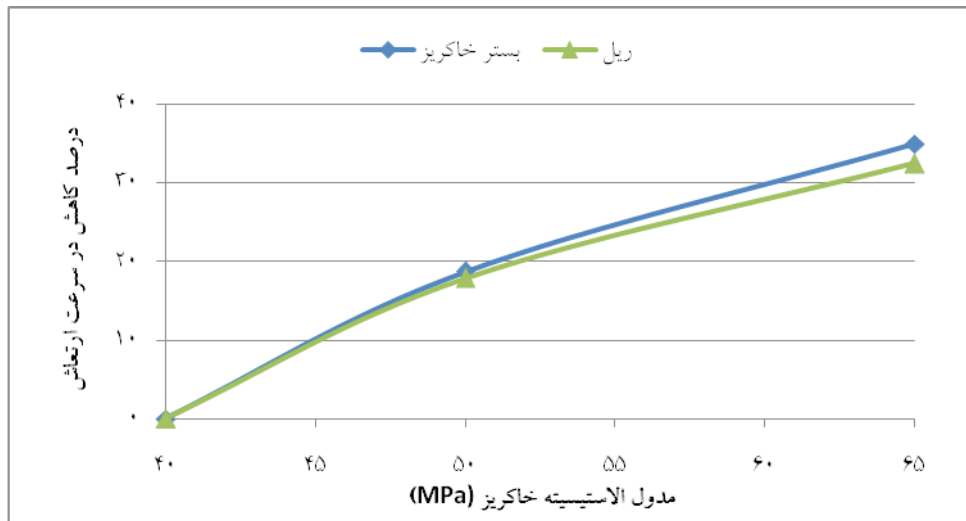
نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود اضافه کردن حدود ۳ متر به ارتفاع خاکریز، به شدت از میزان سرعت ارتعاش خط می کاهد. با افزایش بیشتر ارتفاع خاکریز تاثیر آن در کاهش سرعت ارتعاش، بسیار کم می گردد. بنابراین می توان مقدار تقریبی ضخامت بهینه خاکریز را معادل ۳ متر پیشنهاد کرد.

۶-۳-۲ اثر ضخامت خاکریز

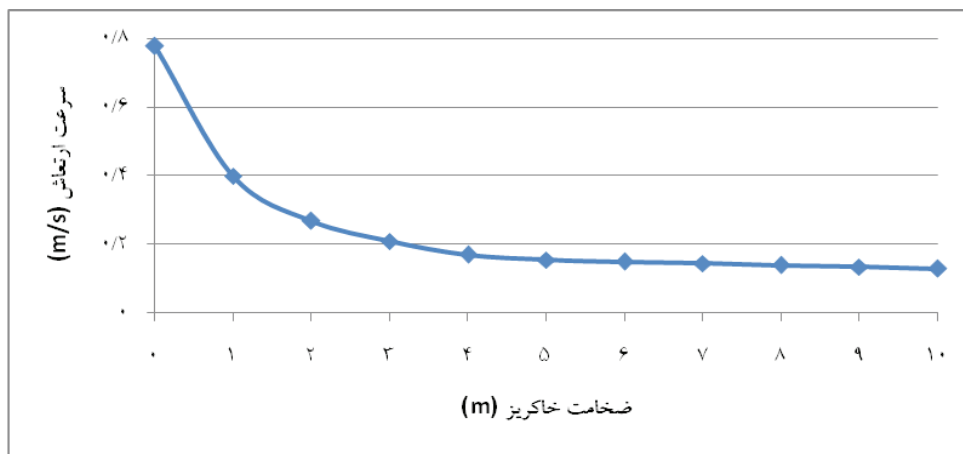
با افزایش ضخامت خاکریز و جرم ارتعاشی زیرسازی، میزان ارتعاشات خط کاهش می یابد. اگر سرعت قطار، ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شود، سرعت ارتعاشی در لایه خاکریز، برای خط بدون خاکریز، ۰/۷۶ و در خط با ۳ متر خاکریز، ۰/۲۱ m/sec است که نشان می دهد در بین عوامل مؤثر بر سطح سرعت ارتعاش، ضخامت خاکریز، بیشترین تاثیر را دارد.

۶-۴ تاثیر سرعت قطار بر سرعت ارتعاشات اجزای خط
شکل ۱۲ تاثیر سرعت قطار را در میزان سرعت ذرات در لایه خاکریز، برای قطار سریع السیر نشان می دهد. با توجه به شکل،

شکل ۱۱ تاثیر ارتفاع خاکریز در کاهش سرعت لایه خاکریز را



شکل ۱۰. تاثیر مدول الاستیسیته خاکریز در کاهش سرعت ارتعاشی لایه‌های ریل و بستر خاکریز



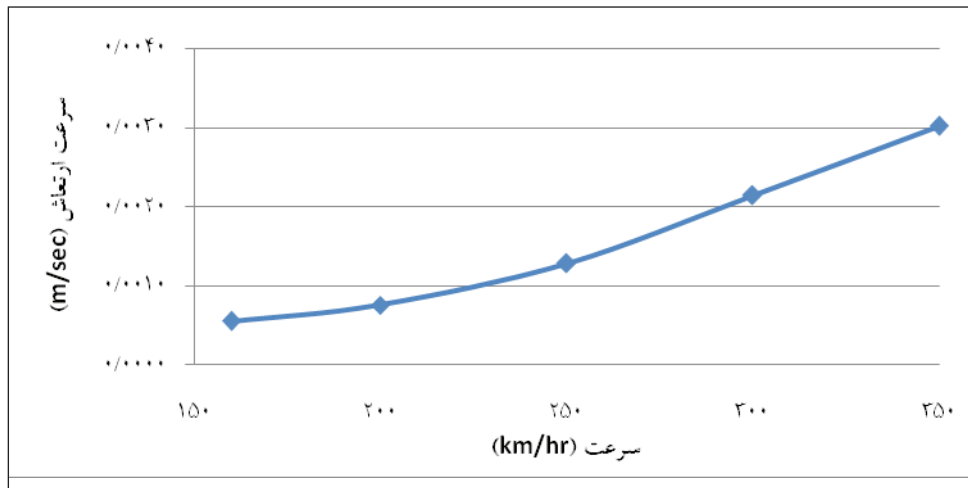
شکل ۱۱. رابطه سرعت ارتعاش خاکریز با ضخامت

۵-۶ تاثیر بار محوری بر سرعت ارتعاش لایه خاکریز راه آهن

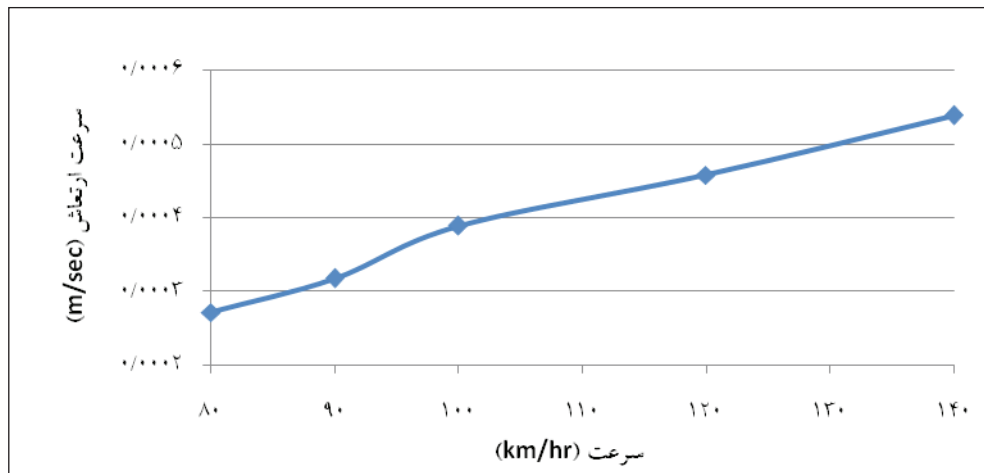
برای بررسی تاثیر دامنه بار بر میزان سرعت ارتعاش لایه خاکریز، از سه نوع قطار باری، مسافری و سریع السیر استفاده شده است. در بررسی تاثیر بار محوری، سرعت قطارهای باری، مسافری و سریع السیر، ثابت و به ترتیب برابر با ۸۰، ۱۲۰ و ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. همچنین ارتفاع لایه خاکریز ثابت و برابر با ۲ متر می باشد.

شکل ۱۴ منحنی تغییرات بار محوری بر حسب سرعت را نشان

با افزایش سرعت قطار از ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت، شیب افزایش سرعت ارتعاش، به تدریج افزایش می یابد. از حدود سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت روند افزایش سرعت ارتعاش تقریباً خطی می شود. برای قطارهای باری و سریع السیر روند افزایش با افزایش سرعت قطار تقریباً خطی می باشد. برای نمونه، شکل ۱۳ روند تغییرات سرعت لایه خاکریز را برای قطار مسافری، نشان می دهد. سطح سرعت ارتعاشات مشاهده شده نسبت به خطوط سریع السیر بسیار کمتر است. علاوه بر آن میزان شیب افزایش سرعت ارتعاش نیز بسیار کمتر از قطار سریع السیر است.

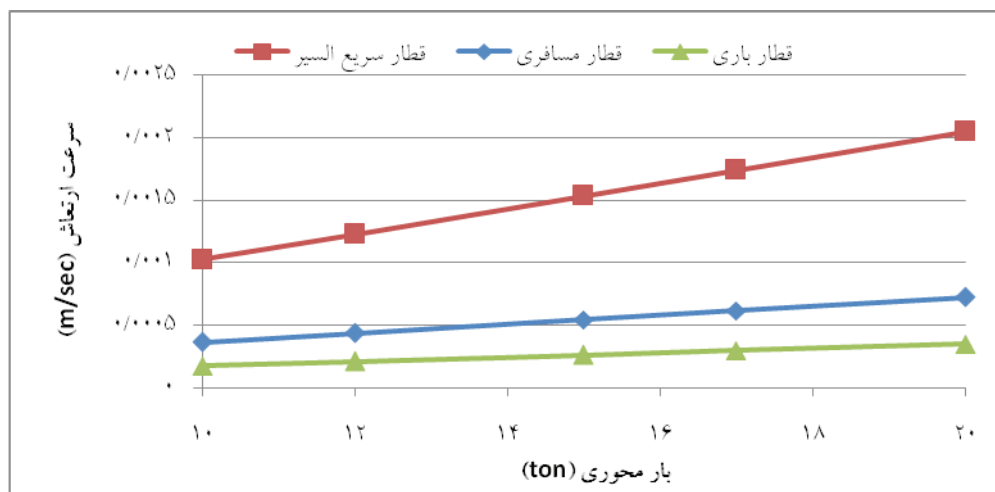


شکل ۱۲. تاثیر سرعت قطار در سرعت ارتعاشات لایه خاکریز در خط سریع السیر



شکل ۱۳. تاثیر سرعت قطار در سرعت ارتعاشات لایه خاکریز در خط مسافری

بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی ...



شکل ۱۴. تاثیر افزایش بار محوری بر سرعت ارتعاش خطوط باری، مسافری و سریع السیر

خاکریز از طریق تحلیل حساسیت روی پارامترهای بار محوری قطار و سرعت حرکت آن و همچنین ضخامت، سختی و میرایی خاکریز اثر این جزء بر کاهش ارتعاشات ریلی مطالعه شده است. عمده نتایج به دست آمده از این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه نمود:

تاثیر میرایی پد در کاهش سرعت ارتعاشات، به خصوص برای لایه های زیرین خط، بسیار کم است. این تاثیر تنها برای ریل و تا حدی بالاست، قابل توجه است.

با افزایش سختی پد، سرعت ارتعاش ریل بیش از ۳۰ درصد کاهش می یابد. ولی با حرکت به سمت خاکریز، تاثیر آن تقریباً از بین می رود.

میرایی و سختی بالاست تاثیر قابل ملاحظه ای بر سرعت ارتعاشات خط ندارد.

ضخامت بالاست تاثیر زیادی بر سرعت ارتعاش اجزای خط دارد به طوری که میزان سرعت لایه بالاست را بیش از ۶۰ درصد کاهش می دهد.

میرایی خاکریز تاثیر قابل ملاحظه ای بر سرعت ارتعاش اجزای خط ندارد.

با افزایش سختی خاکریز، میزان سرعت ارتعاش لایه های مختلف کاهش می یابد. میزان کاهش سرعت ارتعاش بالاست،

می دهد. با توجه به شکل ۱۴، قطار سریع السیر سرعت ارتعاش به مراتب بیشتری نسبت به قطارهای باری و مسافری ایجاد می کند. همچنین با وجود اینکه منحنی تغییرات سرعت برای هر سه نمودار، تقریباً خطی است با این وجود شیب منحنی مربوط به قطار سریع السیر بیشتر از قطارهای باری و مسافری است که این موضوع نشان دهنده تاثیر بیشتر بار محوری بر سرعت ارتعاشات خطوط سریع السیر می باشد. به عبارت دیگر کنترل بار محوری عامل بسیار مهمی در کاهش سرعت ارتعاشات خطوط سریع السیر است. در مورد قطارهای باری و مسافری با وجود اینکه شیب افزایش سرعت لایه خاکریز در قطار مسافری بیشتر است، این میزان چندان محسوس نیست.

۷. جمع بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر از طریق توسعه مدل تحلیلی هر می رفتار دینامیکی خط ریلی در شرایط وجود خاکریز تحت اثر بار ایده آل سینوسی راه آهن مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور معادلات حاکم بر ارتعاش دینامیکی هر یک از اجزای خط نوشته شده و مجموعه معادلات بروش عددی توسط برنامه MATLAB حل شده است. به منظور درک بهتر رفتار هر یک از اجزا، مطالعات پارامتریک جامعی صورت گرفته و به طور ویژه در خصوص

5- U. S. Department of Transportation and Federal Railroad Administration, (2005) «High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment»

6- M.Bahrekazemi, (2004) «Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction» PhD Thesis, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology,

7- Ahlbeck.D.R, Meacham. H.C and Prause R.H, (1978) «The development of analytical models for railroad track dynamics, in: A.D. Kerr (Ed.), Railroad Track Mechanics & Technology», Pergamon Press, Oxford

8- S.L Grassie, R.w.Gregory and K.L Johnson. (1982) «The dynamic response of railway track to high frequency lateral excitation» Journal of Mechanical engineering Science

9- Lou.P,Zeng.Q.Y,(2006) «Vertical Vehivle-Track Coupling Element», Proc.Imech Vol.220 Part F:J. Rail and Rapid Transit, pp.293-304

10- P.Lou, Q.Y.Zeng,(2004) «Formulation of Equation of Motion of Finite Element Form for Vehicle-Track-Bridge integration System with two types of Vehivle Model» Int.Journal for Numerical Methods in Engineerin,pp.435-474

11- International Union of Railways, (1994) «UIC Code 719R: Earthworks and track-bed layers for railway lines», 2nd Edition

12- Coenraad Eaveld, (2001) «Modern Railway Track», 2nd Edition, MRT Productions

13- Galvı'n.P,Domı'nguez.J,(2008) «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

14- Zhai, W.M., Wang, K.Y,(2004) Lin, J.H., «Modeling and experiment of railway ballast vibrations» Journal of sound and vibration, pp.673-683

تحت شرایط فوق بیش از ۳۶ درصد است.

از بین عوامل بررسی شده، ضخامت لایه خاکریز بیشترین تاثیر را در کاهش سرعت ارتعاش دارد. این تاثیر تا ارتفاع حدود ۳ متر دارای شیب تندی است و پس از آن از میزان اثر آن کاسته می شود. با توجه به نتایج به دست آمده، سرعت و بار محوری قطار، تنها در قطارهای سریع السیر تاثیر زیادی بر سرعت ارتعاشات خط دارد.

۸. پانویس ها

- 1 Federal Transit Administration
- 2 Norwegian Geotechnical Institute
- 3 Ballast Mat
- 4 Under Sleeper Pad(USP)
- 5 Side Trenches
- 6 Hertz Theory
- 7 Fast Fourier Transform
- 8 Bogie Passage Frequency
- 9 Ballast Pyramid Model

۹. مراجع

- 1- Madshus.C, M.Kaynia.A, (2001) «High-Speed Trains on Soft Ground: Track-Embankment-Soil Response and Vibration Generation.in Noise and Vibration From High-Speed Trains», edited by V.V. Krylov, Thomas Telford, London, pp. 315-344
- 2- V.V.Krylov,(1994)«On the Theory of Railway-induced Ground Vibrations», Journal de physique, Volume4, pp.769-772,
- 3- V. V. Krylov,(1998) «Ground vibration boom from high speed train: prediction and reality.» Acoustic Bulletin, July/August, pp.15-22
- 4- G.Degrande, (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, Thomas Telford, London, pp. 285-314,

بررسی تاثیر مشخصات خاکریز در خط ریلی بر...

15- Ishida, M., Suzuki, T., Koro, K., ABE, K.,
«Measurement on dynamic behavior of track near
rail joints and prediction of track settlement» QR of
RTRI, Vol. 64, No. 2, June. 2005

16- Y.Q.Sun, M.Dhanasekar, «A dynamic model
for the vertical interaction of the rail track and
wagon system» International Journal of Solids and
Structures, 39, 2002

17- Ishida, M., Suzuki, T., «Effect on track
settlement of interaction excited by leading and
trailing axles» QR of RTRI, Vol. 64, No. 1, Feb.
2005

۱۸- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۶)
«دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن سریع‌السیر»

نشریه شماره ۳۹۴