

بررسی اثر ترانسه‌های V شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار

مرتضی اسماعیلی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

جبارعلی ذاکری، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید علی مسیبی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: m_esmaeili@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۰

چکیده

حمل و نقل ریلی با تکیه بر افزایش بار محوری و سرعت، در سالهای اخیر با پیشرفت قابل توجهی روبرو بوده است. چنان که سروصدا و ارتعاش زمینی ناشی از سیستمهای حمل و نقل ریلی کنترل نشود می تواند تأثیرات قابل توجهی بر مناطق مسکونی و دیگر مکانهای حساس در برابر ارتعاش بگذارد. مرور ادبیات فنی موجود در خصوص کنترل ارتعاشهای ناشی از حرکت قطار بر سازه‌های اطراف، نشان دهنده آن است که روشهای متنوعی برای کنترل ارتعاشهای در خطوط ریلی در مسیر انتشار امواج ارتعاشی و همچنین سازه دریافت کننده توسط پژوهشگران گوناگون ارایه شده است. در این بین، از عمده روشهای ارایه شده در منبع و مسیر می‌توان به حفر ترانسه در طرفین خط اشاره نمود. با توجه به آنکه در مورد تأثیر شکل ترانسه‌های کناری بر کاهش ارتعاشها پژوهش مشخصی صورت نگرفته است، بنابراین پژوهش حاضر با تمرکز بر ترانسه باز، به بررسی اثر ترانسه‌های مثلثی شکل (پله ای شکل) در مقایسه با ترانسه مستطیلی در کاهش ارتعاش پرداخته و در آن برای این منظور از مدلسازی پدیده ارتعاش ناشی از حرکت قطار با بوژی MD36 در سرعتهای گوناگون و با روش عددی اجزاء محدود/نامحدود استفاده شده است. نتایج نشان دهنده آن است که کارایی ترانسه مثلثی نسبت به ترانسه مستطیلی معادل، بالاتر است، زیرا بیشینه Ar (نسبت کاهش دامنه ارتعاش) برای جابجایی نقاط قبل از ترانسه V شکل برای سرعت عبور ۸۰ Km/hr و ۱۲۰ Km/hr در مقایسه با ترانسه مستطیلی مقادیر کمتری را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش‌های زمینی، ترانسه، بارگذاری قطار، روش اجزاء محدود/نامحدود

۱. مقدمه

مورد بررسی قرار گرفته است [Woods, 1968]. به منظور بررسی اثر عایق بندی ترانشه‌های باز و پر شده از بنتونیت - دوغاب در خاک‌های لایه ای از المان‌های محدود همراه با مرزهای جاذب انرژی استفاده شده است [Segol et al, 1978]. همچنین از المانهای محدود/ نامحدود دو بعدی و دو و نیم بعدی به طور پارامتری برای تجزیه و تحلیل اثر عایق بندی ترانشه‌های باز، ترانشه‌های پر و پی‌های الاستیک استفاده شده است [Hung et al, 2004]. سایر کارهای پژوهشی انجام شده در این زمینه توسط افرادی مثل [Beskos, 1985, Emad and Manolis, et al., 1996, Al Hussaini and Ahmad, 1994, Ni Andersen and Nielsen, 2005, 2007-Boström and Karlström, GuangYun et al, 2008, GAO Yang and Hung, 2001, 2008- Gaetano et al, 2012, Kawamura, et.al, 2009] انجام شده است. لازم به یادآوری است که در تمامی کارهای فوق، شکل ترانشه، مستطیل در نظر گرفته شده است. از این رو در مقاله حاضر در ابتدا مروری کلی بر روشهای کاهش ارتعاشها در خطوط ریلی از جمله روشهای کاهش ارتعاش در منبع ارتعاش، در مسیر انتشار و در گیرنده ارتعاش صورت گرفته و در ادامه مروری بر ادبیات فنی موجود در خصوص اثر ترانشه‌ها و همچنین عوامل موثر بر ترانشه‌ها به عنوان یکی از مهم ترین روشهای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آنکه در خصوص تاثیر شکل ترانشه‌های کناری بر کاهش ارتعاشها، پژوهش مشخصی صورت نگرفته است، بنابراین در پژوهش حاضر با تمرکز بر ترانشه‌های روباز، به بررسی اثر ترانشه‌های مثلثی شکل (پله‌ای شکل) در کاهش ارتعاش پرداخته شده و برای این منظور از مدلسازی پدیده ارتعاش ناشی از حرکت قطار به روش عددی اجزاء محدود/نامحدود استفاده شده است. برای مقایسه اثر کارایی ترانشه‌ها از نسبت کاهش دامنه^۴ Ar استفاده شده است [Beskos, et. al, 1986]. بعد از اعتبارسنجی نتایج پژوهش با کارهای انجام شده توسط [Ni, et. al, 1994] و با در نظر گرفتن دو روش اعمال شرایط مرزی با المانهای نامحدود و

حمل و نقل عمومی مردم جهان، بیش از یک و نیم قرن است که برعهده قطارها است. در این راستا انواع گوناگونی از قطارهای راه آهن شامل قطارهای مسافری و باری تا قطارهای سریع السیر توسعه داده شده است. تامین ملاحظات زیست محیطی و الزامات ایمنی از مسائل مهم مرتبط با خطوط ریلی است. در اکثر شهرهای بزرگ جهان به علت استقبال مردم از مترو و راه‌آهن‌های سریع السیر، برخی از مناطق مسکونی حساس به ارتعاش مثل بیمارستانها، آزمایشگاه‌ها، مراکز پژوهشی با دقت بالا و یا ساختمانهای مخبراتی، با مشکل نزدیکی به خطوط راه‌آهن مواجه‌اند. امروزه اکثر پژوهشگران، مهندسان و برنامه ریزان حمل و نقل شهری به بررسی ارتعاشهای ناشی از قطار و تاثیر آن در آسایش انسان و عملکرد تجهیزات با حساسیت بالا پرداخته‌اند [Yang and Hung, 2008]. مراحل اصلی انتقال ارتعاشهای ناشی از حرکت قطار به زیرساختها و سازه‌های مجاور به چهار دسته تقسیم می‌شوند: (الف) ارتعاش سیستم خط^۱، یعنی تحریک ناشی از بار تکراری منظم چرخ بر روی ریل، [Zakeri and Xia, 2008, 2009] (ب) انتشار ارتعاشهای ناشی از حرکت قطار روی ریل در محیط اطراف^۲، (پ) تاثیر ارتعاشهای ریلی بر ساختمانهای مجاور^۳. راهکارهای کاهش ارتعاش زمینی به چندین گروه شامل روشهای کاهش ارتعاش در منبع، در مسیر و در گیرنده قابل دسته بندی است [Esmaeeli and Fesharaki, 1999]. یکی از موثرترین اقدامات برای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار، حفر ترانشه است. سایر روشهای امکان پذیر جهت کاهش ارتعاشها می تواند شامل پی الاستیک، سنگ زنی ریل و صاف کردن چرخ و همچنین استفاده از پدهای ریل، پدهای زیر تراورس، فرش بالاست و غیره باشد. ترانشه‌ها، از جمله ترانشه‌های روباز و پرتن، برای عایق بندی ارتعاش پی‌های ماشین آلات سالهاست که مورد استفاده قرار گرفته اند. با استفاده از روشهای تحلیلی، شکست امواج در اطراف موانع به شکل کروی و سهمی مورد بررسی قرار گرفته است [Pao and Mow, 1963]. میزان اثربخشی ترانشه‌های روباز به صورت آزمایشگاهی برای کاهش ارتعاشها

بررسی اثر ترانشه‌های ۷ شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار

دیوار در این راستا راهکارهای مفیدی به شمار می‌روند (شکل ۱). این روش به صورت دیوارهای سطحی و ترانشه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که عمق بهینه ترانشه‌های پر شده حدود ۱/۲ برابر طول موج رایله است. روش دیگر مؤثر استفاده شده به منظور کاهش ارتعاشهای ناشی از عبور قطار، استفاده از خاک تثبیت شده با ستونهای سیمانی و آهکی در ترانشه‌های پر شده است. تثبیت خاک با آهک یا سیمان در مواقعی که با خاک‌های بسیار نرم مثل رس‌های نرم یا ماسه مواجه هستیم مناسب است. اما در این روش حجم بالایی از خاک باید اصلاح شود، که این مسئله مطمئناً روش مناسبی برای کنترل ارتعاشها نیست، مگر اینکه انجام چنین اصلاحاتی برای نگهداری سازه خط ضروری باشد. از مهم‌ترین نکات ارایه شده در خصوص تاثیر ترانشه‌ها برای کنترل ارتعاشهای ناشی از حرکت قطار بر سازه‌های اطراف می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [Bahrekazemi, 2004, Yang and Hung, 2008]:

- برای ترانشه‌های باز، عرض نرمال شده به طور کلی، بجز برای ترانشه‌های کم عمق مهم نیست، اما عمق ترانشه نرمال شده عامل غالب است.

- برای ترانشه‌های پر، عمق و عرض ترانشه می‌بایست به ترتیب شرایط $\frac{d}{\lambda_R} > 1$ و $\frac{w}{\lambda_R} > 0.3$ را به منظور رسیدن به اثر مطلوب عایق بندی ارضا کنند. (λ_R طول موج رایله است)

- نسبت پواسون یک پارامتر بسیار مهم برای مسائل مربوط به عایق بندی فعال است چرا که می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه ای بر طول موج فشاری تاثیر گذار باشد.

- تأثیر نسبت میرایی و چگالی و همچنین محل قرارگیری

المانهای میراگر برای ترانشه مستطیلی شکل، اثر شکل ترانشه‌های مثلثی در کاهش ارتعاش قطار مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور و برای در نظر گرفتن بار پله ای قطار به صورت واقعی از مشخصات بوژی MD36، در سرعتهای گوناگون استفاده شده است. لازم به یادآوری است که در محاسبه بارگذاری پله ای ناشی از چرخهای قطار از مشخصات بوژی MD36 و برای بارگذاری پله ای از تئوری هرتز استفاده شده است.

۲. بررسی روشهای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار در مسیر انتشار

به منظور بررسی کاهش ارتعاش زمینی ناشی از حرکت قطار در فاصله مورد نظر از محور خط، مباحث گوناگونی از جمله نحوه ایجاد ارتعاش در منبع ارتعاش، انتشار ارتعاش در لایه‌های خاک و سنگ مجاور خط، و اثر متقابل سازه و گیرنده باید مد نظر قرار گیرد. به زبان دیگر راهکارهای کاهش ارتعاش وابسته به مکانیزم ایجاد و انتشار ارتعاشهای زمینی به چندین گروه قابل تقسیم است که جدول ۱ شمای کلی از روشها را نشان می‌دهد [Bahrekazemi, 2004].

در طراحی خطوط ریلی از جمله خطوط مترو باید سعی شود که سازه‌های حساس به ارتعاش دور از خطوط ریلی ساخته شوند. اما این مساله این امکان را به علت مناطق اجباری مورد نظر برای ساخت ایستگاه‌ها و دسترس‌یها به خطوط ریلی شدیداً با محدودیت روبرو می‌سازد. بنابراین باید سعی شود از روشهای دیگری برای کاهش ارتعاش در مسیر انتقال آن به سازه‌های حساس استفاده گردد که ساخت مانع در مسیر انتشار مثل گودال، ترانشه و یا

جدول ۱. روشهای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار

روشها	راهکارهای کاهش ارتعاشهای
سیستم دال شناور، سنگ زنی و صافی ریل، جوشکاری ریل، چرخ ارتجاعی، اصلاح پروفیل چرخ، اصلاح سیستم تعلیق واگن، پابند با خاصیت ارتجاعی، تثبیت خاکریز راه آهن، خط با تکیه گاه ستونی، کاهش سرعت قطار، استفاده از انواع پدها	کاهش در منبع ارتعاش
ساخت مانع (ترانشه)، اصلاح بستر	کاهش در مسیر انتشار
تعبیه تکیه گاه الاستیک، فاصله	کاهش در گیرنده ارتعاش

به طوری که تنها نیمی از مساله نیاز به تجزیه و تحلیل خواهد داشت (شکل ۳). همانطور که در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است، هندسه با یک حوزه نزدیک (قسمت اول) و حوزه دور نامحدود (قسمت دوم) به صورت ایده آل در نظر گرفته شده است. حوزه نزدیک شامل راه آهن، مانع موج، و خاکهای اطراف، معمولا از لحاظ هندسه و مواد نامنظم هستند. این منطقه توسط روش اجزاء محدود شبیه سازی خواهد شد ولی حوزه دور حاوی خاک با مرزهای نامحدود است، که ممکن است همگن باشد یا به صورت خاکهای لایه لایه، با یا بدون سنگ بستر باشد. برای حل چنین مساله ای معمولا شرایط کرنش صفحه ای برای مشخصات دو بعدی از نیمه فضا در نظر گرفته می شود. از آنجا که بار ترافیک در بخش مرکزی راه آهن اعمال می شود همیشه می تواند به عنوان مجموعه ای از بارهای هارمونیک بیان شود. علاوه بر این، برای خاک، میرایی هیستریسیس^۷ در نظر گرفته شده و محیط آن به عنوان یک محیط ویسکوالاستیک ایزوتروپیک مدل شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است در این بخش نیمی از محیط نیم فضا مدلسازی گردیده و تحت اثر بار ناشی از عبور قطار قرار داده شده است. به طور معمول کارآیی موانع موج با استفاده از نسبت کاهش دامنه^۸ (A_p) ارزیابی می شود، که تعریف آن به قرار زیر است [Yang and Beskos, 2008]:

$$A_p = \frac{Ar}{Ar_0} \quad (1)$$

(مانع با زمین سطح جابجایی مقدار) / (مانع بدون زمین سطح جابجایی مقدار)

اگر بخواهیم پاسخ خاک فراتر از محدوده S از مانع را در نظر

ترانشه‌ها در عایق بندی ارتعاشهای ناشی از قطار می تواند به طور کلی نادیده گرفته شود.

- عمده موانع موج برای عایق بندی ارتعاشهای برای امواج با فرکانس‌های بالا مناسب هستند.

- ترانشه‌های پر با سختی بیشتر از خاک اطراف دارای عملکرد بهتری نسبت به ترانشه‌های پر شده با مصالح نرم است.

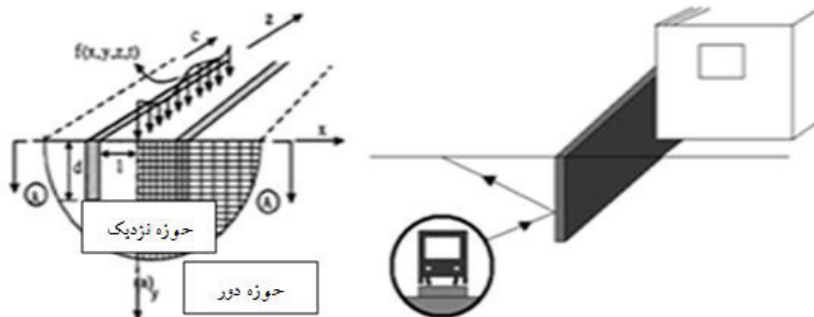
- خاک‌ها با نسبت‌های پواسون بالا می توانند اثر عایق بندی ترانشه‌های پر را کاهش دهند، به این علت که نسبت‌های پواسون بزرگ به طور قابل توجهی به طول موج فشاری بزرگ‌تر منجر خواهد شد.

- ترانشه پر سخت تر (یا نرم تر) بسته به شرایط خاک اطراف، عایق بندی بهتری دارند.

۳. بررسی عددی تاثیر ترانشه مثلثی بر کاهش ارتعاشهای ناشی از عبور قطار

در این بخش ابتدا به مدلسازی عددی تاثیر ترانشه‌های مستطیلی روباز بر کاهش ارتعاشهای ناشی از عبور قطار پرداخته شده و حل عددی با تحلیل‌های تئوریک انجام شده توسط محققین دیگری مقایسه و به این ترتیب اعتبار^۱ و میزان دقت حل عددی مورد تأیید قرار خواهد گرفت. و در ادامه با مدل کالیبره شده به بررسی تاثیر ترانشه مثلثی بر کاهش ارتعاشهای خواهیم پرداخت.

برای این منظور مشخصا از نظر هندسی ترانشه‌ها به موازات هم در کنار راه آهن جهت کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار ساخته می‌شوند و این موضوع باعث ایجاد تقارن در حل مساله می‌شود



شکل ۱- سیستم مانع عبور ارتعاش [Hung et al, 2004]

بررسی اثر ترانشه‌های ∇ شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار

تعریف عبارتند از: فاصله از خط مرکزی^۱ راه آهن $l = L \cdot \lambda_R$ ، عمق $d = D \cdot \lambda_R$ ، عرض $w = W \cdot \lambda_R$ و نیمی از عرض راه آهن $b = B \cdot \lambda_R$ ، و محدوده مورد بررسی $s = S \cdot \lambda_R$ که در آن λ_R طول موج رایله و D ، L ، و W پارامترهایی بی بعد هستند. در حل عددی به روش اجزای محدود و اجزای نامحدود توسط نرم افزار ABAQUS داده‌های زیر برای ترانشه باز در نظر گرفته شده است: پارامتر فاصله $L=1$ ، پارامتر عمق $D=1$ ، پارامتر عرض $W=1/3$ و پارامتر طول $S=9$ ، با این مشخصات مساحت ترانشه باز برابر ۳ مترمربع خواهد بود. در حل دینامیکی حاضر، دو نوع رویکرد برای شبیه سازی مرزها در نظر گرفته می‌شود که هر دو نوع رویکرد در تحلیل حاضر مورد بررسی قرار گرفت که در ابتدا از المانهای نامحدود استفاده شده که بازگشت امواج برشی و حجمی به داخل شبکه المانهای محدود به حداقل برسد. رفتار محیط در فواصل دور از المانهای محدود خطی و ایزوتروپیک فرض شده که برای بخش نامحدود از المان نامحدود خطی CINPE ϵ با ϵ گره استفاده شد، که برای تحلیل مسائل کرنش صفحه ای بکار می‌رود. همچنین رویکرد دیگر استفاده از مرز جاذب انرژی، مرز ویسکوز است. در این روش المانهای میراگر^{۱۱} در مرزها قرار داده شده که ضریب این المانهای میراگر به صورت $F_d = C_d \cdot \dot{u}$ در نظر گرفته می‌شود و این ضریب

بگیریم، می‌بایست نسبت کاهش متوسط دامنه^۹ \bar{A}_r به جای رابطه فوق استفاده شود:

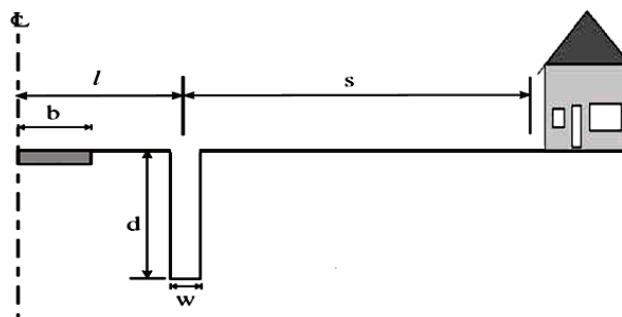
$$\bar{A}_r = \frac{1}{s} \int A_r(x) dx \quad (2)$$

بدیهی است که مقادیر کوچک تر \bar{A}_r نشان دهنده عملکرد مناسب تر مانع در کاهش انتشار امواج است. خواص مصالح مطابق با جدول ۲، مطابق پیشنهاد (Laghrouche and Le Houedec 1994) در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از وابستگی نتایج تحلیل به فرکانس تحریک، تمام پارامترهای هندسی مورد استفاده نسبت به طول موج رایله λ_R نرمال شده است.

با استفاده از اطلاعات خاک، سرعت موج برشی $C_s = (G/\rho)^{1/2} = (18.4 \times 10^6 / 1800)^{1/2} = 101.11 \text{ m/s}$ سرعت موج رایله $C_R = C_s (0.87 + 1.12V)/(1+V) = 93.02 \text{ m/s}$ و طول موج رایله $\lambda_R = C_R / f = 93.02 / 31 = 3 \text{ m}$ است. [Yang and Hung, 2008]. در خصوص مساله فرکانس لازم به یادآوری است که در پژوهش انجام شده توسط Ni و همکاران (1994) یک بارهارمونیک با فرکانس $f=31\text{Hz}$ در خط اعمال شده است که در مدلسازی عددی حاضر نیز عینا از همین فرکانس به منظور اعتبارسنجی استفاده شده است. با توجه به ترانشه باز نشان داده شده در شکل ۳، پارامترهای هندسی طبق

جدول ۲. خصوصیات مصالح [Yang and Hung, 2008]

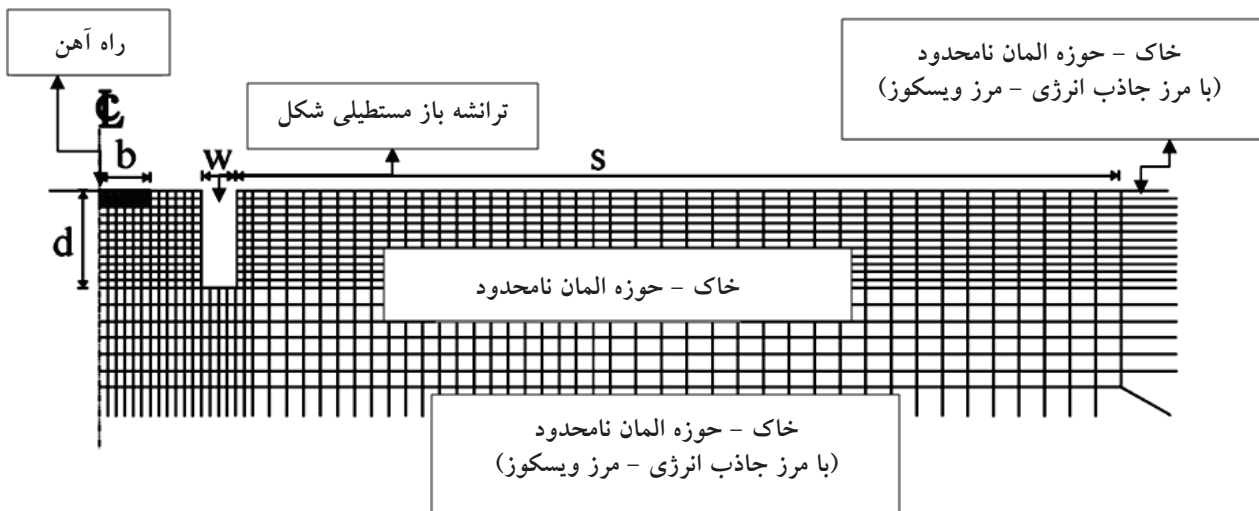
نسبت میرایی β	چگالی ρ (kg/m^3)	نسبت پواسون ν	مدول یانگ E (MPa)	مصالح
۰/۰۵	۱۸۰۰	۰/۲۵	۴۶	خاک
۰/۱۰	۱۵۰	۰/۲۵	۱	پی الاستیک
۰/۰۲	۲۴۰۰	۰/۲۵	۱۳۵۰۰	راه آهن



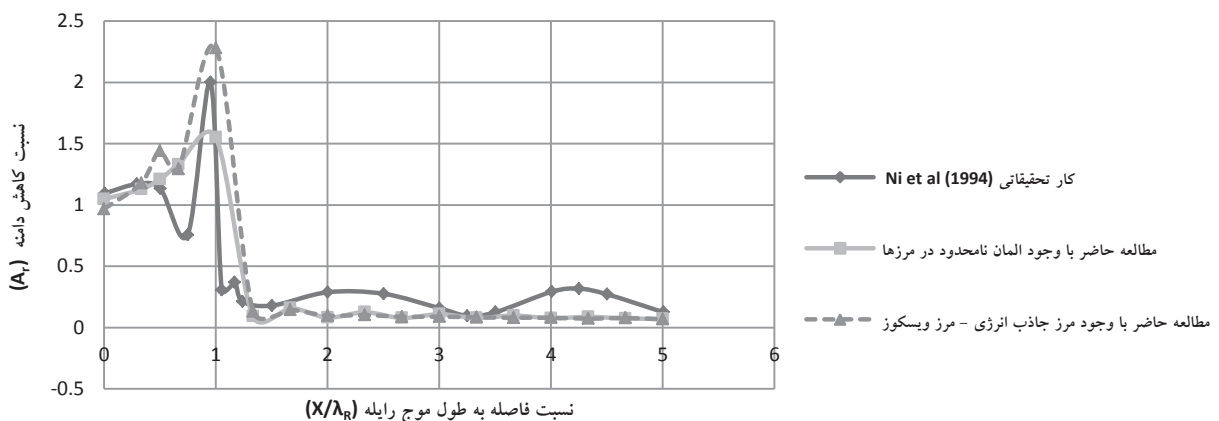
شکل ۲. طرح شماتیک مساله برای ترانشه رو باز [Yang and Hung, 2008]

مطالعه حاضر با فرض دو حالت برای شرایط مرزی اعم از المان نامحدود و میراگر تطابق مناسبی با حل ارایه شده توسط [Ni, 1994] دارد که این موضوع موید اعتبار روش حل عددی حاضر و قابلیت تعمیم به ترانسه‌ها با دیگر اشکال است (شکل ۴). همان طور که دیده می‌شود مقدار Ar قبل از ترانسه یعنی در $X/\lambda R=1$ دچار افزایش قابل توجه شده و بیشینه مقدار A_p در این نقطه یعنی قبل از ترانسه رخ می‌دهد. پس از اعتبارسنجی نتایج، اثر شکل ترانسه‌های گوناگون مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. برای در نظر گرفتن شکل مناسبی از ترانسه‌ها، در ابتدا رفتار ارتعاش ذرات در داخل محیط خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای یک سطح به صورت $C_d = \rho v_s A$ فرض می‌شود که در آن ρ جرم مخصوص خاک و v_s سرعت موج برشی و A سطح تحت پوششش هر یک از المانها است. همچنین در تحلیل حاضر بار آهن به صورت هارمونیک اعمال شده است. ابتدا بار هارمونیک به صورت سینوسی و بعد به صورت کسینوسی در نظر گرفته شده و سپس نتایج با استفاده از برهم نهی حاصل از دو بار هارمونیک به دست آمده است. برای تایید صحت این روش، نتایج توسط روش ارایه شده با افرادی مثل [Ni, 1994] با استفاده از المانهای نامحدود و المانهای میراگر مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که تغییرات A_p برحسب فاصله بی بعد برای



شکل ۳. مش بندی المان محدود/نامحدود (المان محدود/مرز جاذب انرژی) با وجود ترانسه روباز مستطیلی



شکل ۴. نتایج اعتبارسنجی حل عددی برای ترانسه مستطیلی رو باز پژوهش حاضر از طریق مقایسه آن با نتایج حل تحلیلی Ni و همکاران (1994) در دو حالت مرز نامحدود و مرز جاذب انرژی

بررسی اثر ترانشه‌های V شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار

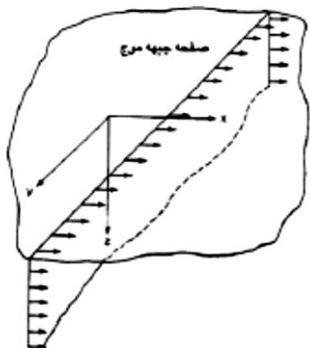
علاوه بر موج فشاری یا اتساعی و موج پیچشی یا برشی که با دو سرعت گوناگون انتشار می‌یابند، با توجه به شرایط مرزی مربوطه امکان یافتن موج سومی که در حوالی مرز منتشر می‌شود با نام موج رایله وجود دارد. این موج در نزدیکی‌های سطح منتشر شده و با عمق مستهلک می‌شود. دامنه جابجایی نقاط محیط در شرایط انتشار امواج رایله از معادلات زیر تبعیت می‌کند:

$$u(z) = e^{-\frac{q}{N}(ZN)} + \frac{2 \frac{q}{N} \frac{s}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} e^{-\frac{s}{N}(ZN)} \quad (3)$$

$$w(z) = \frac{2 \frac{q}{N}}{\frac{s^2}{N^2} + 1} e^{-\frac{s}{N}(ZN)} - \frac{q}{N} e^{-\frac{q}{N}(ZN)} \quad (4)$$

در روابط بالا $\frac{q}{N} = \sqrt{1 - \alpha^2 K^2}$ و $\frac{s}{N} = \sqrt{1 - K^2}$ است. همچنین $\alpha^2 = \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2$ و $\alpha^2 K^2 = \left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2$ است که در آن V_S ، V_P و V_R به ترتیب سرعت موج برشی، سرعت موج فشاری و سرعت موج رایله است.

از آنجا که شرایط بارگذاری خطوط ریلی بسیار نزدیک به شرایط بارگذاری هارمونیک نقطه‌ای بر نیم فضا است، قطعاً مقدار قابل توجهی از انرژی ارتعاشی به صورت موج رایله منتشر می‌شود. با ترسیم مقادیر دامنه جابجایی‌های افقی و قائم موج رایله با عمق در شکل ۷، دیده می‌شود که در اعماق که تقریباً تغییرات این دو پارامتر خطی است، بنابراین اگر فرم مانع یا ترانشه کناری نیز با فرم دامنه جابجایی‌ها همخوانی داشته باشد، بیشترین تاثیر را در میرایی خواهد داشت.

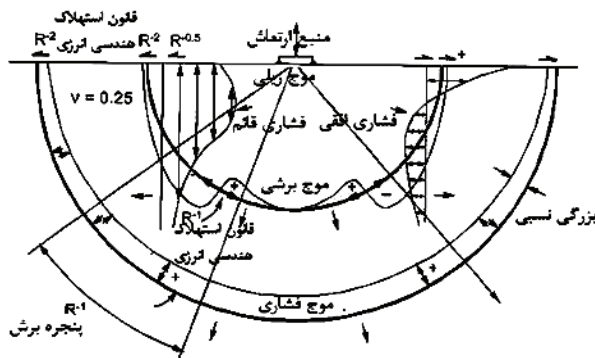


شکل ۶. انتشار موج در یک محیط ارتجاعی نیم فضا [Mirhosseini, 1994]

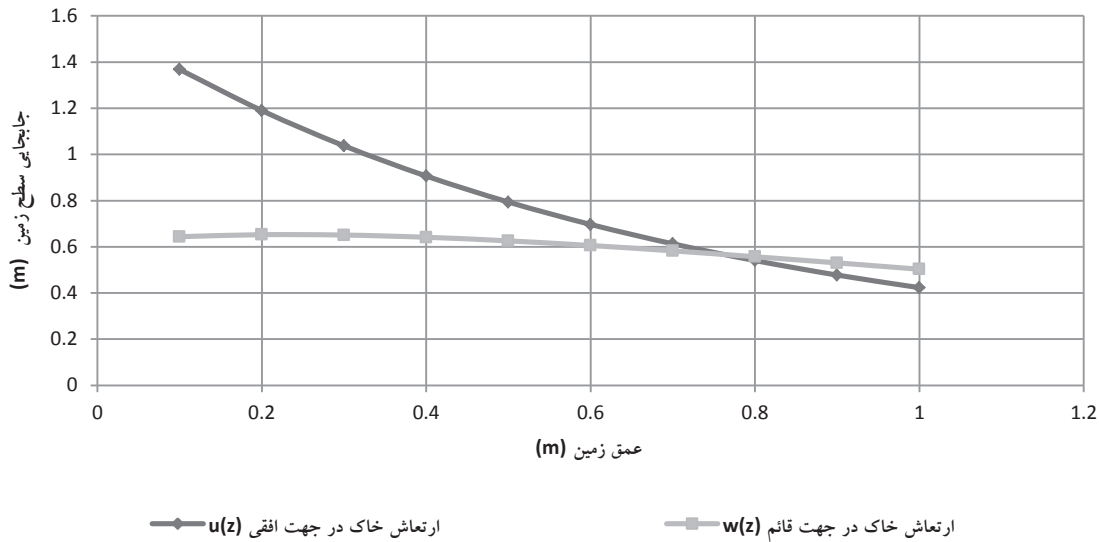
۴. مبانی پیشنهاد کار بر روی ترانشه V شکل برای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار

به منظور پیدا کردن شکل مناسب ترانشه برای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار، ابتدا لازم است مبانی ارتعاشها در داخل محیط خاک مورد بررسی قرار گیرد که در این راستا به طور معمول، تئوری کلاسیک انتشار امواج مورد توجه قرار می‌گیرد تا به این وسیله انواع گوناگون امواج به همراه میرایی آنها مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به شرایط حاکم بر نیم فضا، [Graff, 1973] نشان داد که در شرایط اعمال یک بار نقطه‌ای، هر دو امواج فشاری P و برشی S با نرخ متناسب با r^{-1} کاهش می‌یابند. در اینجا r فاصله منبع تا نقطه در نظر گرفته شده درون نیم فضا است. در مقابل، پاسخ برای مورد یک بارخطی به صورت گسترش استوانه‌ای انرژی است که در این حالت هم، میزان میرایی برای امواج P و S متناسب با $r^{-1/2}$ در داخل نیم فضا است. بنابراین امواج رایله R عمدتاً در نزدیکی سطح زمین منتشر می‌شوند، اما امواج حجمی P و S عمدتاً در داخل نیم فضا منتشر می‌گردند. بنابراین امواج رایله در سطح زمین نسبت به امواج حجمی دارای استهلاک کمتری هستند و انرژی بیشتری را منتقل می‌کنند. امواج رایله R عمدتاً در نزدیکی سطح وجود دارند، اما امواج P و S دارای توانایی بهتر در نفوذ به داخل نیم فضا هستند. به همین دلیل امواج R به عنوان امواج سطحی^{۱۲}، و امواج P و S به عنوان امواج حجمی^{۱۳} نامبرده شده‌اند. در اشکال زیر انواع گوناگون امواج و میرایی آنها ملاحظه دیده می‌شود. [Mirhosseini, 1983]

همان طور که گفته شد برای یک محیط ارتجاعی نیمه محدود،



شکل ۵. انواع گوناگون امواج در نیم فضای کروی و میرایی آنها [Bahrekazemi, 2004] و [Mirhosseini, 1994]



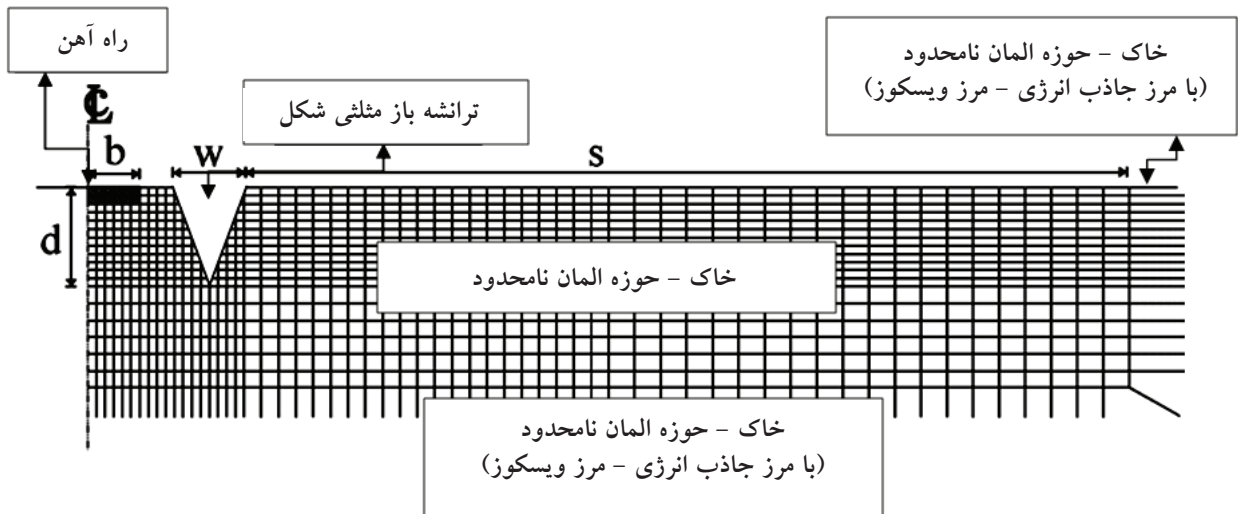
شکل ۷. محاسبه ارتعاشهای ذرات خاک

قطار MD36

با توجه به استدلال ارائه شده در بخش قبل جهت کارایی مناسب تر ترانسه V شکل، در این بخش انواع گوناگون ترانسه های کناری V شکل با مساحت های گوناگون تحت بار پله ای بوژی MD36 مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای محاسبه بار پله ای قطار در ابتدا مشخصات بوژی MD36 و سپس ضریب ضربه دینامیکی و قطرهای بیضی هر ترانسه محاسبه شده تا بارهای پله ای شکل قطار با توجه به سرعت های گوناگون آن بدست آید و در ادامه اثر هر کدام از این بارهای پله ای شکل بر انواع گوناگون ترانسه های V

همان طور که در شکل دیده می شود مولفه u نسبت به W با نسبت شدیدتری مستهلک می شود و می توان نتیجه گرفت که اگر از ترانسه های پله ای U و V شکل استفاده کنیم، کاهش ارتعاش های نسبت به ترانسه های مستطیلی شکل با مساحت برابر کمتر خواهد بود [Mossayebi et.al, 2011]. با این توجیه در بخش بعد ضمن معرفی ترانسه V شکل مقایسه ای میان عملکرد آن با ترانسه مستطیلی به روش عددی صورت خواهد گرفت.

۵. بررسی اثر ترانسه های V شکل تحت اثر بار پله ای^۴



شکل ۸. مدل المان محدود/نامحدود راه آهن (متقارن) با ایجاد ترانسه مثلثی شکل

بررسی اثر ترانشه‌های ۷ شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار



شکل ۹. نمای بوژی دو محوره MD36 با متعلقات

جدول ۳. ویژگیهای چرخ محور

نام ویژگی	طول (mm)
فاصله دو محور (wheelset base)	۲۵۰۰
فاصله دو دایره غلتش (tape_circle_distance)	۱۵۰۰
طول محور (axle_length)	۲۰۰۰
شعاع دایره غلتش (Rolling radius)	۴۶۰

این نوع بوژی در جدول ۳ و شکل ۹ ارایه شده است.

شکل (شکل ۸) مورد بررسی قرار داده شده است.

در ادامه، با توجه به معادلات هرتز، ابتدا بار دینامیکی چرخ و سپس قطرهای بیضی هرتز برای بوژی MD36 مربوط به قطار مسافری با سرعت‌های گوناگون محاسبه شده است. در این راستا دیگرام بار پله ای بر حسب زمان استخراج شده که به عنوان ورودی بارگذاری به نرم افزار ABAQUS جهت انجام تحلیل دینامیکی در حوزه زمان معرفی گردیده است [Mossayebi, et al., 2011]

با توجه به مقادیر پارامترهای مرتبط با خصوصیات بوژی MD36 مانند شعاع (R) و بار دینامیکی چرخ (P) و فرض مقدار مناسب برای قطر کوچک بیضی تماس چرخ و ریل (۲b) و مدول الاستیسیته (E)، در ابتدا قطر بزرگ بیضی سطح تماس (۲a)

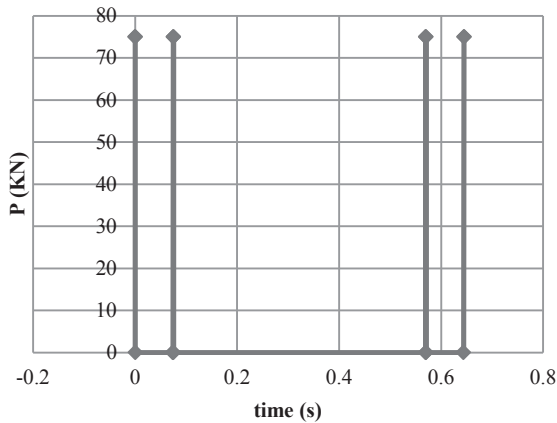
۱-۵ مشخصات بوژی MD36 و محاسبه بار محور

مربوط براساس تئوری هرتز

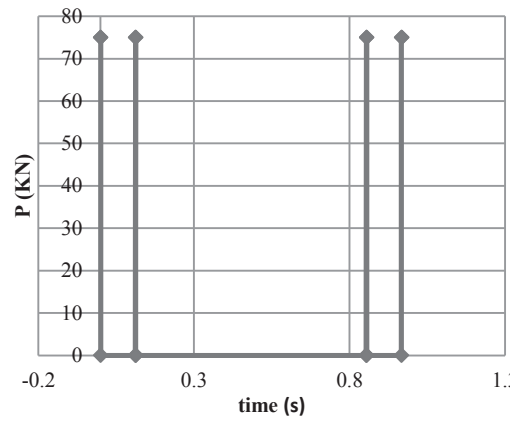
بوژی، سیستم تعلیق واگن است که در جلو و عقب واگن قرار گرفته و واگن بر روی آن سوار می شود. بوژی دارای انواع بسیار متنوعی است و با توجه به مشخصات واگن مورد نظر (مقدار وزن، باری یا مسافری، ...) طراحی می شود. در پژوهش حاضر از مشخصات بوژی آلمانی MD36 که از متداول ترین بوژیهای قطار مسافری موجود در راه آهن جمهوری اسلامی ایران به شمار می رود، استفاده شده است. البته این بوژی دارای انواع گوناگونی است که در مواردی نیز دارای تفاوت‌های قابل ملاحظه است. مشخصات هندسی

جدول ۴. محاسبه قطرهای بیضی هرتز برای سرعت

نسبت پواسون V	مدول الاستیسیته ریل E (N/mm ²)	2a (mm)	2b (mm)	بار دینامیکی چرخ (KN)	ضریب ضربه Ø	بار استاتیکی چرخ ps(KN)	بار استاتیکی محور ps(KN)	شعاع چرخ (mm)	سرعت قطار Km/hr
۰/۳	۲۱۰۰۰۰	۱۴/۶۲	۱۲	۱۲۵/۴۱۹	۱/۶۷	۷۵	۱۵۰	۴۶۵	۱۲۰
۰/۳	۲۱۰۰۰۰	۱۳/۶۱	۱۲	۱۰۸/۶۱	۱/۴۴	۷۵	۱۵۰	۴۶۵	۸۰



ب) نمودار بار - زمان قطار برای سرعت ۱۲۰ Km/hr



الف) نمودار بار - زمان قطار برای سرعت ۸۰ Km/hr

شکل ۱۰. نمودار بار - زمان قطار برای سرعت های گوناگون شامل دو بوژی دو محوره

۶. بررسی رفتار ترائشه V شکل تحت اثر بار بوژی MD36 با سرعت های گوناگون

با توجه به ایده طرح شده در بخشهای قبل برای استفاده از ترائشه باز V شکل در کاهش ارتعاشهای ریلی، در این قسمت پس از محاسبه ضریب ضربه دینامیکی و قطرهای بیضی هر تیز بوژی MD36، برای به دست آوردن بارهای پله ای شکل قطار و با توجه به ابعاد گوناگون ترائشه V شکل مانند عمق ترائشه d و عرض ترائشه w ، ترائشه مذکور تحت بار بوژی MD36 با سرعت های ۸۰ Km/hr و ۱۲۰ Km/hr مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

۶-۱ بررسی رفتار ترائشه V شکل برای سرعت سیر ۸۰ Km/hr

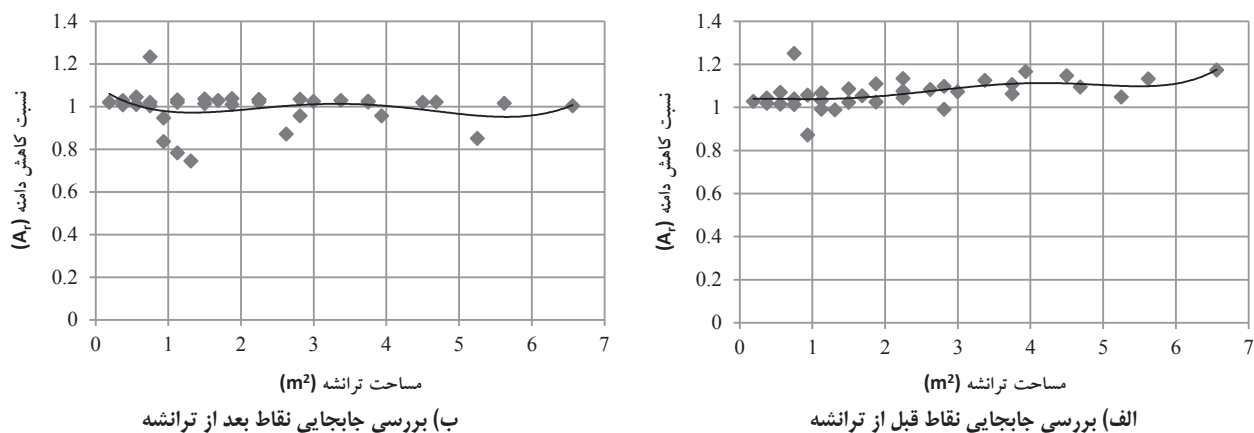
در این قسمت با توجه به ابعاد گوناگون ترائشه V شکل مانند عمق ترائشه d (۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵، ۳، ۳/۷۵، ۴/۵، ۵/۲۵ متر) و عرض ترائشه w (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ متر)، ترائشه V شکل تحت بار قطار MD36 با سرعت ۸۰ Km/hr مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که در این راستا اثر انواع گوناگون ترائشه های V شکل با توجه به مساحت های گوناگون هم قبل و هم بعد از ترائشه بررسی شده است. نتایج تحلیل عددی در قالب A_p در جداول و اشکال زیر ارایه شده اند [Mossayebi, et.al, 2011]

مطابق با رابطه (Eisenmann, 1970) به دست آمده است:

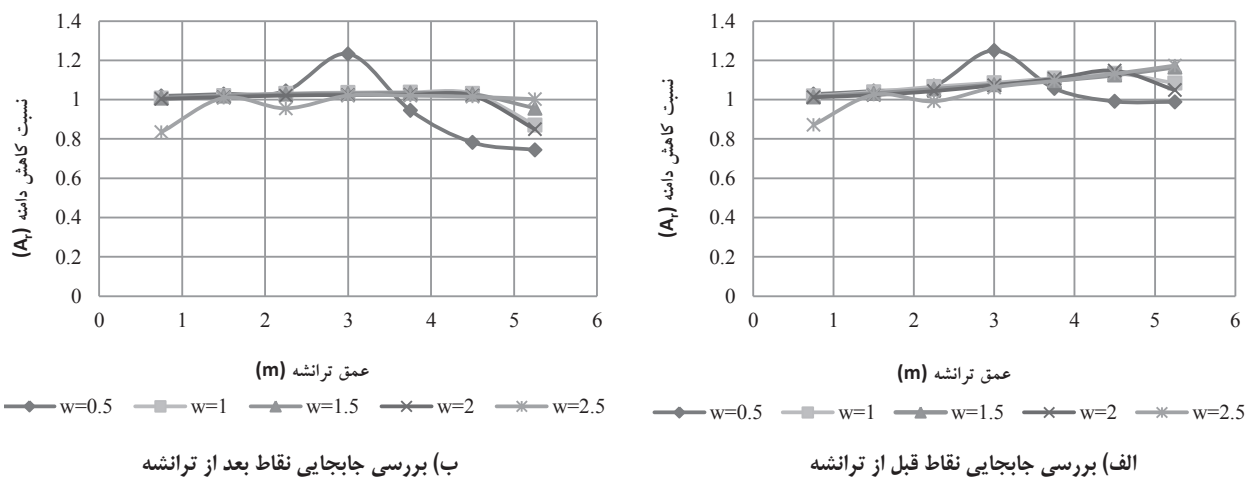
$$2a = 3.04 \left[\frac{P.R.10^3}{2b.E} \right]^{0.5} \quad (5)$$

و سپس با در نظر گرفتن سرعت های گوناگون قطار و همچنین فواصل بین چرخ محورها و بوژیها، زمان اعمال نیروی وارده بر خط در این طول محاسبه شده است. در نهایت دیاگرام بار قطار بر حسب زمان با توجه به سرعت قطار و فواصل چرخ محورها رسم شده و به عنوان ورودی به نرم افزار جهت انجام تحلیل دینامیکی معرفی شده است. لازم به یادآوری است که دیاگرام بار گذاری پله ای که به این صورت ایجاد می شود دارای عرض پله بسیار ناچیزی است که در شکل ۱۰ قابل نمایش نیست، چرا که عرض پله مذکور برابر با $\frac{2a}{V}$ در نظر گرفته شده است. یادآوری می شود همان طور که در بخش بعد دیده خواهد شد، با توجه به متوسط و حداکثر سرعت بهره برداری از قطارهای مسافری در کشور به ترتیب سرعت های ۸۰ و ۱۲۰ Km/hr برای محاسبه تاریخچه زمانی بار ورودی انتخاب شده اند. پس از محاسبه بارهای اعمالی قطار و همچنین ترسیم نمودار پله ای شکل بار- زمان برای سرعت های گوناگون، اثر انواع گوناگون ترائشه V شکل بر اساس عمق، عرض و مساحت های گوناگون بر کاهش میزان ارتعاش های ناشی از عبور قطار مورد بررسی قرار داده می شود.

بررسی اثر ترانشه‌های V شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار



شکل ۱۱. بررسی اثر ترانشه‌های V شکل با ابعاد گوناگون بر کاهش ارتعاشهای در نقاط اطراف برای قطار با سرعت سیر ۸۰ Km/hr



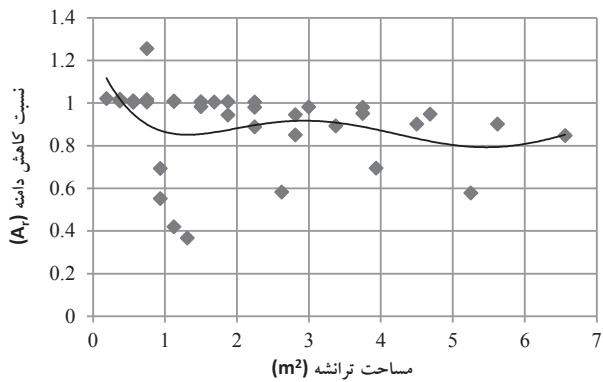
شکل ۱۲. بررسی اثر ترانشه‌های V شکل با عمق و عرض‌های گوناگون بر کاهش ارتعاشهای در نقاط اطراف ناشی از قطار با سرعت سیر ۸۰ Km/hr

همان‌طور که از اشکال فوق ملاحظه می‌شود، عمده نتایج حاصل برای سرعت سیر ۸۰ Km/hr به صورت زیر قابل جمع بندی است: - بیشینه مقدار A_p برای جابجایی نقاط قبل از ترانشه V شکل برابر ۱/۲۵ است که از ترانشه مستطیلی کمتر است. همچنین با افزایش مساحت ترانشه V شکل مقدار A_p تقریباً بیشتر می‌شود و یک روند صعودی دارد که به این دلیل است که هر چه قدر که مساحت ترانشه بزرگ تر می‌شود به میزان بیشتری، از انتشار امواج جلوگیری خواهد کرد که این موضوع باعث افزایش A_p می‌شود. همچنین با افزایش عمق ترانشه هر چه قدر که عرض ترانشه بیشتر می‌شود، مقدار A_p بیشتر می‌شود که این روند در عرض‌های بیشتر تغییرات خطی دارد. - بیشینه مقدار A_p برای جابجایی نقاط بعد از ترانشه V شکل برابر

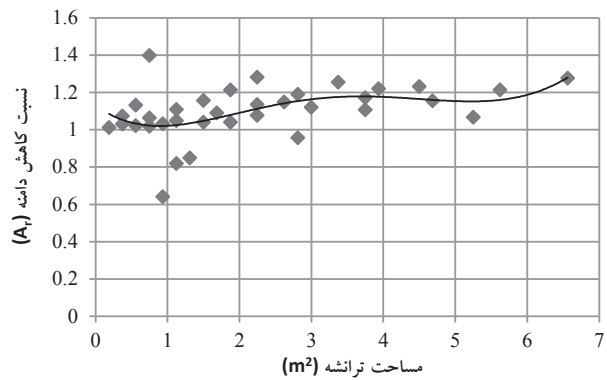
۱/۲۳ است. همچنین با افزایش مساحت ترانشه V شکل مقدار A_p روند تقریباً ثابتی است. در عین حال با افزایش عمق ترانشه مقدار A_p با افزایش عرض ترانشه نیز به مقدار ثابتی می‌رسد. - نسبت A_p قبل از ترانشه V شکل با افزایش مساحت ترانشه، افزایش می‌یابد، ولی نسبت A_p قبل از ترانشه V شکل با افزایش مساحت ترانشه، کاهش می‌یابد که این افزایش و کاهش با افزایش سرعت قطار، با شدت بیشتری همراه می‌گردد.

۶-۲ بررسی رفتار ترانشه V شکل برای سرعت سیر ۱۲۰ Km/hr

در این قسمت با توجه به ابعاد گوناگون ترانشه V شکل مانند عمق ترانشه d (۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵، ۳، ۳/۷۵، ۴/۵، ۵/۲۵ متر) و

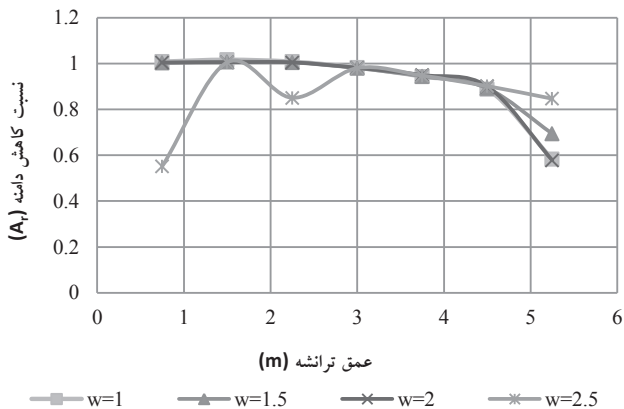


ب) بررسی جابجایی نقاط بعد از ترانشه

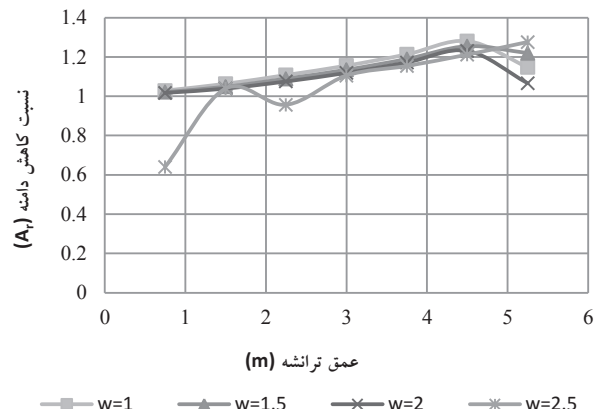


الف) بررسی جابجایی نقاط قبل از ترانشه

شکل ۱۳. بررسی اثر ترانشه های V شکل با ابعاد گوناگون بر کاهش ارتعاشهای در نقاط اطراف برای قطار با سرعت سیر ۱۲۰ Km/hr



ب) بررسی جابجایی نقاط بعد از ترانشه



الف) بررسی جابجایی نقاط قبل از ترانشه

شکل ۱۴. بررسی اثر ترانشه های V شکل با عرض و عمق و عرض های گوناگون بر کاهش ارتعاشهای در نقاط اطراف ناشی از قطار با سرعت سیر ۱۲۰ Km/hr

مساحت ترانشه V شکل مقدار A_p بیشتر می شود و یک روند صعودی دارد که به این دلیل است که هر چقدر که مساحت ترانشه بزرگ تر می شود به میزان بیشتری از انتشار امواج جلوگیری خواهد کرد که این موضوع باعث افزایش A_p قبل از ترانشه می شود. همچنین با افزایش عمق ترانشه هر چقدر که عرض ترانشه بیشتر می شود، مقدار A_p افزایش می یابد، که این روند در عرضهای بیشتر تغییرات خطی دارد.

- نکته دیگر اینکه سرعت ۸۰ Km/hr نسبت به سرعت ۱۲۰ Km/hr دارای جابجایی کمتر و همچنین روند صعودی کندتری است و تقریباً به مقدار ثابتی می رسد.

- بیشینه مقدار A_p برای جابجایی نقاط بعد از ترانشه V شکل برابر ۱/۲۶ است. همچنین با افزایش مساحت ترانشه V شکل

عرض ترانشه w (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ متر)، ترانشه V شکل تحت بار قطار MD36 با سرعت ۱۲۰ Km/hr مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که در این راستا اثر انواع گوناگون ترانشه های V شکل با توجه به مساحت های گوناگون، هم قبل و هم بعد از ترانشه بررسی شده است. نتایج تحلیل عددی در قالب Ar در جداول و اشکال زیر ارائه شده است [Mossayebi, et.al., 2011]

همان طور که از اشکال فوق ملاحظه می شود، عمده نتایج حاصل برای سرعت سیر ۱۲۰ Km/hr به صورت زیر قابل جمع بندی است:

- بیشینه مقدار A_p برای جابجایی نقاط قبل از ترانشه V شکل ۱/۴۰ است که از ترانشه مستطیلی کمتر است. همچنین با افزایش

بررسی اثر ترانسه‌های V شکل جهت کاهش ارتعاشهای محیطی ناشی از حرکت قطار

ثابتی به خود می‌گیرد.

- با افزایش مساحت ترانسه V شکل از $0.2m^2$ تا $5/6m^2$ مقدار A_p قبل از ترانسه V شکل افزایش می‌یابد که علت این امر این است که هر چقدر که مساحت ترانسه بزرگ تر شود به میزان بیشتری از انتشار امواج جلوگیری خواهد کرد که این موضوع باعث افزایش A_p می‌شود.

- با افزایش عمق و عرض ترانسه، مقدار A_p قبل از ترانسه V شکل بزرگ تر می‌شود که این روند در عرضهای بیشتر تغییرات خطی دارد.

- مقدار A_p قبل از ترانسه V شکل با افزایش مساحت ترانسه V شکل، افزایش می‌یابد، ولی این مقدار قبل از ترانسه V شکل با افزایش مساحت ترانسه، کاهش می‌یابد که این افزایش و کاهش با افزایش سرعت قطار، با شدت بیشتری همراه می‌شود.

۸- پی نوشتها

- 1 Generation
- 2 Transmission
- 3 Reception
- 4 Amplitude reduction ratio
- 5 Interaction
- 6 Verification
- 7 Hysteretic damping
- 8 Amplitude reduction ratio
- 9 Average amplitude reduction ratio
- 10 Centerline
- 11 Dashpot
- 12 Surface waves
- 13 Body waves
- 14 Step load

۹- مراجع

- اسماعیلی، مرتضی و فشارکی، محمد "بررسی تاثیر خاکریز در خط ریلی بر کاهش ارتعاشهای ناشی از عبور قطار"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره ۲، زمستان ۱۳۸۸، ص. ۶۱-۷۷.

- مسیبی، سید علی، ذاکری، جبارعلی و اسماعیلی، مرتضی "کاهش ارتعاشهای قطار روی ساختمانهای اطراف با استفاده از

مقدار A_p کمتر می‌شود و یک روند نزولی دارد که به این دلیل است که هر چقدر که مساحت ترانسه بزرگ تر می‌شود به میزان بیشتری از انتشار امواج جلوگیری خواهد کرد که این موضوع باعث می‌شود که مقدار A_p بعد از ترانسه کاهش یابد. همچنین با افزایش عمق ترانسه مقدار A_p برای هر مقدار عرض مشخص کمتر می‌شود که این روند در عرضهای بیشتر روند ثابتی به خود می‌گیرد.

۱۰. نتیجه گیری

یکی از روشهای موثر بر کاهش ارتعاشهای منتشره از قطار در محیط اطراف، استفاده از ترانسه در حریم جانبی خط است و پژوهشهای انجام گرفته مبنی بر آن است که به طور استاندارد از ترانسه‌های مستطیلی برای این منظور استفاده شده است. با توجه به آنکه در مورد تاثیر شکل ترانسه‌های کناری بر کاهش ارتعاشها پژوهش مشخصی صورت نگرفته است، بنابراین پژوهش حاضر با تمرکز بر ترانسه‌های روباز به بررسی اثر ترانسه‌های مثلثی شکل در کاهش ارتعاش پرداخته و برای این منظور از مدل‌سازی پدیده ارتعاش ناشی از حرکت قطار به روش عددی اجزاء محدود/ نامحدود (المانهای میراگر) استفاده شده است. مهم ترین یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:

- تحلیل عددی نتایج نشان می‌دهد که مولفه u نسبت به w با نسبت شدیدتری مستهلک می‌شود و در نتیجه اگر از ترانسه‌های پله ای و V شکل استفاده کنیم، ارتعاشها نسبت به ترانسه‌های مستطیلی شکل با مساحت برابر کمتر می‌شود.

- بیشینه مقدار A_p برای جابجایی نقاط قبل از ترانسه V شکل برای سرعت سیر 80 Km/hr برابر با 1/25 است که از مقدار ترانسه مستطیلی برابر با 2 کمتر است.

- بیشینه مقدار A_p برای جابجایی نقاط قبل از ترانسه V شکل برای سرعت سیر 120 Km/hr برابر با 1/40 است که از مقدار ترانسه مستطیلی برابر با 2 کمتر است.

- جابجایی نقاط و مقدار A_p در سرعت سیر 80 Km/hr نسبت به سرعت سیر 120 Km/hr کمتر و روند صعودی کندتر و تقریبا

Dover Publications", New York.

- Hung, H. H. (2000) "Ground vibration induced by high-speed trains and vibration isolation counter-measures", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

- Hung, H. H., Yang, Y. B., and Chang, D. W. (2004) "Wave barriers for reduction of train-induced vibrations in soils", *J. Geo. & Geo-environmental Eng.*, 130(12), pp.1283-1291.

-Hung, H. H., Yang, Y. B. and Chang, D. W. (2004) "Wave barriers for reduction of train-induced vibrations in soils," *Journal of Geotechnical & Geoenvironment Engineering, ASCE*, 130(12), pp.1283-1291.

- Karlström, A. and Boström, A. (2007) "Efficiency of trenches along railways for trains moving at sub- or supersonic speeds", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp.625-641.

- Kawamura, Shozo, Ito, Syu, Yoshida, Takahiro and Minamoto, Hirofumi (2010) "Isolation effect of a dynamic Dashpot and a trench on ground vibration caused by a construction machine", *Applied Acoustics*, Volume 72, Issue 4, pp.151-156.

- Laghrouche, O. and Le, Houedec, D. (1994) "Soil-railway interaction for active isolation of traffic vibration", *Adv. in Simulation & Interaction Techniques*, Eds.: Papadarakakis, M. and Topping, B. H. V., Civil-Comp Press, Edinburgh, Scotland, pp.31-36.

- Ni, S. H., Feng, Z. Y. and Tsai, P. S. (1994) "Analysis of the vibration response and screening effectiveness of strip foundations", *J. Chinese Inst. Civil and Hydraulic Eng.*, 6(3), pp.269-277.

- Pao, Y. H., and Mow, C. C. (1963) "Scattering of plane compressional waves by a spherical obstacle", *J. Appl. Phys.*, 34, pp.493-499.

- Segol, G., Lee, C. Y. and Abel, J. F. (1978) "Amplitude reduction of surface waves by trenches", *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, 104, pp.621-641.

- Woods, R. D. (1968) "Screening of surface waves in soils", *J. Soil Mech. Found*, pp.951-979.

ایجاد ترانشه در حریم خط آهن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تیر ماه ۱۳۹۰.

- میرحسینی، سید مجدالدین "دینامیک خاک"، دانشگاه تهران، زمستان ۱۳۷۲.

- Andersen, L. and Nielsen, S.R.K. (2005) "Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 701-716.

- Al-Hussaini, T. M. and Ahmad, S. (1996) "Active isolation of machine foundations by in-filled trench barriers", *J. Geot. Eng.*, ASCE, 122(4), pp. 288-294.

- Bahrekazemi, M. (2004) "Train-induced ground vibration and its prediction", PhD Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology KTH, Stockholm.

- Beskos, D. E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I. G. (1986) "Vibration isolation using open or filled trenches, Part 1: 2-D Homogeneous Soil", *Comp. Mech.*, 1(1), pp. 43-63.

-Eisenmann,J. (1970) "Stress distribution in the permanent way due to heavy axle loads and high speed", *AREMA Proceeding* , Vol 71, pp.24-59.

- Emad, K. and Manolis, G. D. (1985) "Shallow trenches and propagation of surface waves". *J. Eng. Mech.*, ASCE, 111(2), pp.279-282.

- Gaetano, DiMino, Marinella, Giunta, and Ciro, Maurizio Di Liberto (2009) "Assessing the open trenches in screening railway ground-borne vibrations by means of artificial neural network", *Advances in Acoustics and Vibration*, Volume 2009, Article ID 942787, 12 pages.

- Gao, Guangyun, Shi, Gang, Feng, Shijin and Qiu, Chang (2008) "3D analysis of in-filled trench as passive barriers for ground vibration isolation", *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*.

- Graff, K. F. (1973) "Wave motion in elastic solids,

- Zakeri, J. A. and Xia, H. (2008) "Sensitivity analysis of track parameters on train-track dynamic interaction" *Journal of Mechanical Science & Technology*, Vol. (22), No. 7, pp.1299-1304.
- Zakeri, J. A. and Xia, H. (2009) "Application of 2D-infinite beam elements in dynamic analysis of railway track" *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.(23), No. 5, pp. 1415-1421.
- Yang, Y. B. and Hung, H. H. (2001) "A 2.5D finite/infinite element approach for modeling visco-elastic bodies subjected to moving loads", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 51(11), pp.1317-1336.
- Yang, Y. B., Hung, H. H. and Hsu, L. C. (2008) "Ground vibrations due to underground trains considering soil-tunnel interactions", *Interaction and Multi-scale Mech., an Int. J.*, 1(1), pp.157-175.
- Yang, Y. B. and Hung, H. H. (2008) "Wave propagation for train-induced vibrations: A finite/infinite element approach", Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte.