

"تونلسازی و تغییر اقلیم"

۶-۸ آذر ماه ۱۳۹۶

شبیه سازی بار دینامیکی قطار با استفاده از سری فوریه در تونل‌های منفرد و دوقلو

داریوش محمدی^۱، احسان آزاد^{۲*}، کورش شهريار^۳ حسین سالاری راد^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ d.mohammadi@aut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ehsazad@aut.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ k.shahriar@aut.ac.ir

^۴ استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ salarirh@aut.ac.ir

چکیده فارسی

امکان‌پذیری ایمن تونل‌های قطار شهری در دو فاز بحرانی حفاری (در هنگام ساخت) و عبور قطار (در هنگام بهره‌برداری) بر سازه‌های اطراف، یکی از کلیدی‌ترین فاکتورها در تحلیل، طراحی، اجرا و بهره‌برداری تونل‌ها است. هر بار عبور قطار از داخل تونل باعث اعمال باری دینامیکی با فرکانسی حدود ۲ تا ۲۰۰ هرتز به کف تونل و خاک اطراف آن می‌شود. این بارگذاری دینامیکی می‌تواند بر سازه‌های مجاور اثر مخرب داشته و یا برای ساکنین ساختمان‌های اطراف مزاحمت ایجاد کند. هدف از این مطالعه، ایجاد راه‌حلی کاربردی به کمک سری فوریه برای مدلسازی بار اعمالی از طرف چرخ‌های قطار با توجه به سرعت و وزن واگن‌ها است. در این مطالعه، به بررسی رفتار تونل‌های منفرد و دوقلو در اثر عبور قطارهای شهری پرداخته شده است. برای این منظور، تونل دو طرفه‌ی خط ۷ متروی تهران در محدوده‌ی ایستگاه برج میلاد تا میدان صنعت با روباره‌ی حدود ۹/۵ متر بررسی شده است. در این نوشتار، بار دینامیکی عبور قطار با استفاده از سری فوریه از حوزه‌ی زمان به فرکانس تبدیل شد و به کمک نرم‌افزار PLAXIS 2D، دامنه، فرکانس و زاویه فاز بدست آمده از سری فوریه مدلسازی شد و میزان لرزش سطح زمین به صورت نگاشت‌های جابجایی، سرعت و شتاب ارائه شده است. از مهم‌ترین نتایج بدست آمده می‌توان به این نکته اشاره کرد که در تونل منفرد، عبور یک قطار و یا دو قطار تغییر قابل توجهی در مقدار جابجایی سطح زمین، سرعت و شتاب ایجاد نمی‌کند، اما در مورد تونل‌های دوقلو مقادیر سرعت و شتاب به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد ولی جابجایی مقدار کمتری را نشان می‌دهد و میرایی در سرعت و شتاب در حالت تونل‌های دوقلو بیشتر از حالت منفرد است. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که تونل‌های دوقلو (در حالت عبور دو قطار با هم) مقدار سرعت و شتاب بیشتری را در سطح زمین نسبت به تونل منفرد (در حالت عبور دو قطار با هم) نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، سری فوریه، سیستم خاک و سازه، خط ۷ مترو تهران، بار دینامیکی قطار

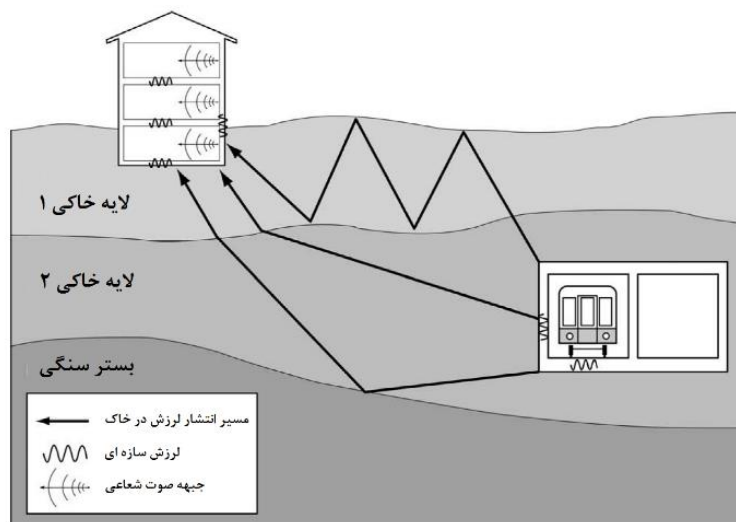
۱- مقدمه

بارهای دینامیکی، به بارهایی اطلاق می‌شود که اندازه، جهت و نقطه اثر آن با زمان تغییر می‌کند که به صورت $P = F(T)$ قابل بیان است. بارهای استاتیکی حالتی خاص از بارهای دینامیکی محسوب می‌شوند که به صورت تابع ثابت تعریف می‌شوند؛ به عبارت دیگر، شتاب‌های متغیر در یک سیستم دینامیک یا پویا نیروهایی متناسب با بزرگی و کوچکی خود بوجود می‌آورند که مجموعه بارگذاری با شدت‌های متغیر را بر سازه اعمال می‌کنند. می‌توان از طریق معادله دیفرانسیل و انتگرال‌گیری، شدت بار متوسط را در هر مقطع بدست آورد. به طور کلی، بارهای دینامیکی به دو گروه تناوبی و غیرتناوبی تقسیم می‌شوند [۱].

برای بارهای تناوبی می‌توان یک دوره تناوب یا بسامد در نظر گرفت. از این گونه بارها در طبیعت می‌توان بارهای ناشی از امواج مثل جزر و مد دریا و نیروهای وارده بر دستگاه‌ها در اثر ارتعاشات ناشی از کارکرد مولدهای انرژی سیستم و یا گاه در اثر تنظیم نبودن بخشی از سیستم لرزش‌های ارتعاشی می‌تواند ایجاد شود. برای بارهای غیرتناوبی نمی‌توان زمان تناوب خاصی را تعریف کرد. مثال این گونه بارها بار ناشی از یک انفجار بر روی سازه یا بار لرزه‌ای وارده از زمین به هنگام زلزله است. بارهای ضربه‌ای خود نوعی از بارهای دینامیکی محسوب می‌شوند. بنابراین آن گونه از بارهایی که بطور ناگهانی بر سازه وارد می‌شوند، بار دینامیکی ضربه‌ای محسوب می‌شوند. وقتی اجسام الاستیک یا ارتجاعی باشند بارهای ضربه‌ای در آن‌ها ارتعاشی ایجاد می‌کنند که آنقدر ارتعاش و لرزش ادامه می‌یابد تا سیستم به عبارت فیزیکی به حالت تعادل برسد، در این صورت گفته می‌شود که سازه به میرایی می‌رسد [۱].

در علم دینامیک سازه‌ها می‌توان بعضاً بارهای غیرتناوبی را توسط تبدیلات سری فوریه به صورت سری‌هایی از بارهای تناوبی و نمودارهای سینوسی و کسینوسی تحلیل و ترسیم نمود. مهم‌ترین استفاده از قوانین دینامیک و اصول بارگذاری‌های اجباری طبیعی (طوفان و گردبادهای شدید، زلزله و ضربه) یا آنچه که در سیستم‌های طراحی شده مهندسی (ارتعاشات کارکرد موتورها، شکستن دیوار صوتی ناشی از امواج ارتعاشی موتورهای سرعت بالای جت‌ها، ارتعاشات سازه‌ای در نیروی برش پایه زلزله و حرکت فونداسیون و از این قبیل) پیش می‌آید [۱].

انتخاب مسیر تونل‌های شهری به عواملی از جمله مسائل ترافیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی وابسته است. لذا امکان‌پذیری ساخت و بهره‌برداری تونل‌های شهری در دو فاز بحرانی حفاری (در هنگام ساخت) و عبور قطار (در هنگام بهره‌برداری)، باید بررسی شود. هر بار عبور قطار از داخل تونل باعث اعمال باری دینامیکی با فرکانسی حدود ۲ تا ۲۰۰ هرتز به کف تونل و خاک اطراف آن وارد می‌شود. این بارگذاری دینامیکی می‌تواند بر سازه‌های مجاور اثر مخرب داشته و یا برای ساکنین ساختمان‌های اطراف مزاحمت ایجاد کند [۲]. مفهوم کلی انتشار لرزش حاصل از عبور قطار به ساختمان در شکل ۱ نشان داده شده است. با حرکت چرخ‌های قطار بر روی ریل‌ها انرژی لرزشی ایجاد می‌شود که از طریق سیستم نگهداری موجود به سازه اعمال می‌شود. مقدار انرژی انتقالی به سازه به طور محسوس به عواملی از جمله زبری سطح چرخ و ریل، فرکانس تشدید سیستم تعلیق قطار و سیستم نگهداری مسیر وابسته است. این سیستم‌ها همانند تمامی سیستم‌های مکانیکی دارای تشدید بوده که موجب افزایش لرزش در فرکانس‌های خاصی می‌شوند که به آن فرکانس طبیعی می‌گویند. لرزش سازه انتقالی (قطار) باعث القا ارتعاش به زمین مجاور شده که در نتیجه موجب گسترش امواج لرزه‌ای از محیط‌های متفاوت خاکی و سنگی به پی ساختمان‌های مجاور می‌شود [۳]. این حرکت لرزه‌ای به شکل متناوب و معکوس و در قالب یک چرخه عمل می‌کند. بازه تغییرات این چرخه نیز عموماً بسیار متغیر بوده و مقادیری کمتر از یک هرتز تا بیش از ۱۰ هرتز را در بر می‌گیرد [۴].

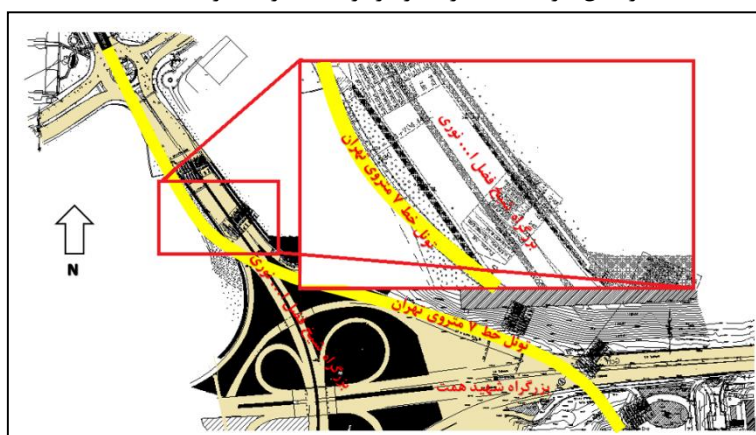


شکل (۱): انتشار لرزش حاصل از عبور قطار به ساختمان [۳].

پارامترهایی از جمله سرعت عبور قطار، وزن قطار، فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز تونل، موقعیت هندسی تونل، مشخصات لایه‌های خاک و سطح آب زیرزمینی مهمترین عوامل تاثیرگذار بر میزان ارتعاش خاک اطراف تونل است؛ از طرفی علاوه بر استفاده از تونل‌های منفرد در پروژه‌های معمول زیرزمینی امروزه با توجه به کوچک بودن مقطع حفاری و در نتیجه کاهش نشست سطح زمین و بالابردن سطح ایمنی در زمان ساخت و بهره‌برداری، تونل‌های دو قلو مورد توجه بسیاری از کارفرمایان قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، ایجاد راه‌حلی کاربردی بدین صورت که بار دینامیکی اعمالی از طرف چرخ‌های قطار با توجه به سرعت و وزن واگن‌ها به کمک سری فوریه از حوزه‌ی زمان به فرکانس تبدیل می‌شود که در این حالت می‌توان در نرم‌افزار PLAXIS 2D با استفاده از دامنه، فرکانس و زاویه فاز بدست آمده، تحلیل عددی را انجام داد و به بررسی اثر عبور قطار از داخل تونل‌های منفرد و دو قلو بر نقاط سطح زمین به کمک تحلیل دینامیکی پرداخت و درنهایت، میزان لرزش سطح زمین را به صورت نگاشت‌های جابجایی، سرعت و شتاب نشان داد.

۲- مشخصات تونل مورد مطالعه

خط ۷ متروی تهران دارای طول ۲۷ کیلومتر با ۲۲ ایستگاه است. این خط از ورزشگاه تختی در جنوب شرق تهران (در جهت شرقی - غربی) شروع می‌شود و مسیر خود را در تقاطع نواب صفوی (در جهت جنوبی - شمالی) تغییر می‌دهد و در نهایت به میدان کتاب در سعادت‌آباد (شمال غرب تهران) می‌رسد. محدوده مورد مطالعه در کیلومتر ۲۱+۶۰۰ تا ۲۱+۷۰۰ در حد فاصل ایستگاه‌های برج میلاد تا میدان صنعت در موقعیت بزرگراه شیخ فضل الله نوری قرار دارد که در شکل ۲ نمای کلی آن نشان داده شده است که متوسط روباره در این محدوده ۹/۵ متر و قطر حفاری شده تونل برای حالت منفرد با استفاده از دستگاه TBM، ۹ متر در نظر گرفته شده است [۵]. در حالت فرضی برای تونل‌های دو قلو که به وسیله TBM حفاری شده باشند قطر ۶ متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه لرزش حاصل از عبور قطار در سطح زمین در مقایسه با بار ترافیکی بزرگراه شیخ فضل الله نوری بسیار کوچک است لذا در مدل‌سازی عددی از تاثیر بار ترافیک صرف نظر شده است.



شکل (۲): نمای کلی محدوده مورد مطالعه در حد فاصل ایستگاه‌های برج میلاد تا میدان صنعت [۵].

با توجه به بررسی‌های زیرسطحی، ذرات تشکیل دهنده ناحیه مذکور عمدتاً از سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه تشکیل شده است که در دو متر ابتدایی آن خاک دستی مشاهده شده است. پارامترهای مکانیکی خاک ناحیه مورد مطالعه که به نام ET-5 نام گذاری شده است در جدول ۱ نمایش داده شده است. برای معیار گسیختگی خاک در این مطالعه از معیار مور کولمب استفاده شده است.

جدول (۱): خواص مکانیکی لایه های خاک [۶].

ضخامت لایه m	مدول الاستیک MN/m ²	چسبندگی KN/m ²	زاویه اصطکاک داخلی درجه	وزن مخصوص KN/m ³	نسبت پوآسون
۰-۲	۲۰	۱۵	۲۰	۱۶	۰/۴۰
>۲	۳۵	۵۰	۲۵	۱۷	۰/۳۵

۳- روش‌های تعیین بار دینامیکی قطار

لرزش زمین در اثر حرکت قطار در تونل‌های زیرزمینی، اثری مهم و شناخته شده است که در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه پاسخ دینامیکی زمین، در برابر نیروی ناشی از حرکت قطار مورد توجه شاخه‌های مختلف مهندسی می‌باشد. تحقیقات انجام شده در این زمینه را می‌توان به چهار گروه تحلیلی، اندازه‌گیری‌های میدانی، مدل‌های پیش‌بینی تجربی و شبیه‌سازی عددی تقسیم کرد. بسیاری از تحقیقات بر روی ارتعاش‌های زمین ناشی از حرکت قطار در تونل‌های زیرزمینی با اندازه‌گیری‌های میدانی [۷] و مدل‌های پیش‌بینی تجربی [۸-۱۱] انجام شده است. با توجه به این حقیقت که اندازه‌گیری‌های میدانی، ابزار مطمئنی برای پیش‌بینی دقیق سطح ارتعاشات در وضعیت‌های واقعی می‌باشند و مدل‌های پیش‌بینی تجربی راه‌های ارزان‌تر و آسان‌تری به منظور تخمین انتشار امواج برای ریل‌های زیرزمینی هستند، لذا این روش‌ها بیشتر انجام شده است. با این وجود هیچ کدام از این رویکردها برای مطالعه پارامتری وضعیت‌های مختلف مناسب نیستند. در مقابل، رویکردهای تحلیلی، برای مطالعه پارامتری می‌توانند استفاده شوند. با این وجود، به علت وجود سازه تونل و تغییرات در لایه‌های خاک، نظریه کلاسیک موج الاستیک روش موثری برای بررسی ارتعاش‌های زمین همراه با ترافیک راه‌آهن زیرزمینی در نظر گرفته نمی‌شود. کارهای اولیه انجام شده با این رویکرد معمولاً در حالت دوبعدی بودند، همانند [۱۲-۱۴]، در این منابع یک مدل تحلیلی سه بعدی برای مطالعه ارتعاش زمین در اثر عبور قطار در تونل با مقطع دایره‌ای پیشنهاد شده است. تونل با یک طول نامحدود و پوسته دایره‌ای نازک فرض شده است، در حالی که خاک اطراف بوسیله معادلات موج برای یک محیط الاستیک مدل شده است.

روش‌های عددی مثل روش المان محدود، توانایی شبیه‌سازی سازه تونل و تغییرات در لایه‌های خاک را دارند، لذا در مورد ارتعاش‌های ناشی از حرکت

قطار در تونل‌های احاطه شده با چندین لایه خاک بیشتر مورد علاقه مهندسين قرار گرفته‌اند. مرزهای لزج همراه با المان‌های محدود برای بررسی ارتعاش یک سیستم مترو-خاک-سازه در سنگاپور به کار گرفته شد [۱۵]، همچنین روشی مشابه، برای مطالعه اثر تغییرات دیوارهای تونل به کار گرفته شد [۱۶]، در منبع [۱۷] از یک روش تطبیقی المان محدود دو بعدی با فرض کرنش مسطح برای آنالیز دوباره سیستم مترو-خاک-سازه مشابه استفاده کردند. روش کوپل المان محدود - مرز محدود برای بررسی کیفیت نتایج بدست آمده از یک مدل دو بعدی تونل مترو در مقایسه با نتایج بدست آمده از یک مدل سه بعدی استفاده شد [۱۸]. در سال ۲۰۰۶ یک فرمولاسیون تناوبی سه بعدی کوپل المان محدود - المان مرزی، برای مطالعه اندرکنش دینامیکی بین یک تونل و خاک لایه‌ای در اثر یک تحریک هارمونیک روی آبگذر تونل استفاده شد [۱۹]، علاوه بر این، در منبع [۲۰] یک مدل المان محدود مقایسه‌ای برای پیش‌بینی ارتعاش‌های تولید شده با ترافیک راه آهن زیرزمینی ارائه شد. چنین مدلی شامل سه زیرمدل، مدل تغییرشکل استاتیکی، مدل ریل و مدل انتشار است. یک مطالعه پارامتری نیز برای شناسایی عواملی که ممکن است بر دقت روش پیشنهادی اثر بگذارد انجام شده است؛ روش دیگر برای شبیه سازی مرز نیمه بینهایت روش المان نامحدود است، که با موفقیت برای مسائل مرتبط با ارتعاش زمین ناشی از حرکت قطار روی سطح زمین اعمال شده است [۲۱-۲۲]. میلن و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی فرکانس ناشی از بارهای عبور و مرور قطار کار کردند، آن‌ها دریافته‌اند که در فرکانس‌های پایین، طیف‌های اندازه‌گیری شده ناشی از عبور و ارتعاش قطار به صورت منقطع است که از این نتیجه می‌توان برای مقاصد طراحی استفاده کرد [۲۳]. کوستا و همکاران در سال ۲۰۱۲ با ساخت مدل عددی ۲/۵ بعدی تفاضل محدود - المان مرزی، ارتعاش ناشی از عبور قطار را مدل کردند. در نهایت برای صحت‌سنجی مدل خود از سیستم حمل و نقل ریلی پرتقال استفاده کردند [۲۴]. نوتسیوس و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ با ایجاد روابط همبستگی بین بار ناشی از عبور قطار و همچنین تاثیر متقابل چرخ و ریل، ارتعاش ناشی از عبور قطار را تخمین زدند. آن‌ها در مطالعات خود به بررسی دو ریل کنار هم و چهار نوع متفاوت قطار پرداختند [۲۵]. کارهای اخیر در این زمینه نشان می‌دهد بررسی پدیده ارتعاش ناشی از حرکت قطارها از اهمیت ویژه‌ای در علوم مهندسی برخوردار بوده و در حال تبدیل شدن به یکی از معیارهای اصلی در طراحی و ساخت تونل‌ها و سایر فضاهای مربوط به حرکت قطارها می‌باشد.

۴- تعیین بار دینامیکی قطار به روش تحلیلی

با عبور قطار از داخل تونل، یک بار دینامیکی متناوب به کف تونل وارد می‌شود. به منظور ارزیابی ارتعاش، لازم است فرکانس‌های اصلی تابع نیروی اعمالی برحسب زمان بدست آمده و نقش هریک از این فرکانس‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. تبدیل فوریه بدون حذف اطلاعات، تابعی را از حوزه زمان به حوزه فرکانس می‌برد. البته در تبدیل‌های واقعی مقدار کمی از اطلاعات به علت قطع کردن بسط سری‌ها از یک جا به بعد حذف می‌شود ولی با به کاربردن جمله‌های کافی در بسط می‌توان این خطا را در حد دلخواه کاهش داد. ذکر این نکته ضروری است که مشارکت فرکانس‌های بالا در پاسخ دینامیکی بدست آمده کمتر از فرکانس‌های پایین است. این موضوع به دلیل فرکانس‌های طبیعی پایین سیستم، امری منطقی است. با توجه به این موضوع در سرعت‌های پایین‌تر می‌توان از تعداد جملات کمتری استفاده کرد. اگر یک تابع متناوب با دوره تناوب T داشته باشیم این تابع را می‌توان با یک سری فوریه به صورت معادله ۱ نشان داد [۲۶].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right) \right] \quad (1)$$

که در این رابطه a_0 ، a_n و b_n ضرایب سری فوریه نامیده شده و به صورت معادلات ۲، ۳ و ۴ بدست می‌آید:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right) dt \quad (4)$$

در این مطالعه ابتدا در مدل طولی واگن‌ها، نیروی اعمال شده از طرف قطار به کف محاسبه شده و سپس همین نیرو در مدل عددی به صورت بار نقطه‌ای به کف تونل اعمال می‌شود. پاسخ زمین در برابر قطار متحرک وابسته به فاصله محور چرخ‌ها، وزن قطار و سرعت قطار می‌باشد ولی علاوه بر آن‌ها، عوامل دیگری نیز بر میزان لرزش زمین اثر می‌گذارند.

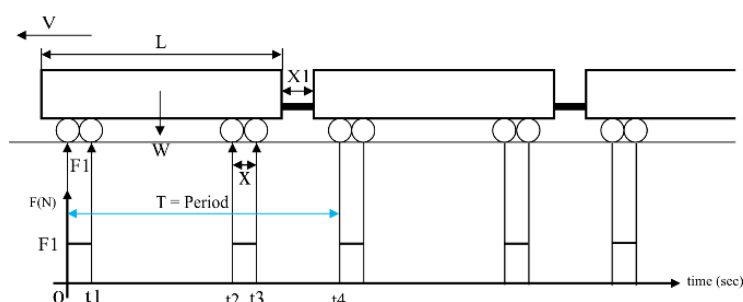
۴-۱- عبور یک قطار

در این مطالعه با در نظر گرفتن سه پارامتر فاصله محور چرخ‌ها، وزن قطار و سرعت قطار، تابع بار دینامیکی قطار تعیین شده و با اعمال آن به مدل عددی در تراز تونل میزان لرزش روی سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. اگر ابعاد واگن‌های قطار و جهت حرکت آن‌ها مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شود، با داشتن اطلاعات جدول ۲ می‌توان تابع مربوط به نیروهای اعمال شده توسط چرخ واگن‌ها را به شرحی که در شکل ۳ ارائه خواهد شد، ترسیم نمود.

جدول (۲): مشخصات قطارهای نسل سوم متروی تهران [۲۷].

طول یک واگن (m)	سرعت حرکت قطار (m/s)	فاصله بین دو واگن (m)	فاصله‌ی بین محورهای دو چرخ مجاور هم (m)	جرم یک واگن به همراه مسافرین یا بار (Ton)	نیروی اعمال شده توسط هر محور واگن (Ton)
$L = 19/5$	۸۰	$X_1 = 0/5$	$X = 1/5$	$W = 100$	$F = 9/81 * W/4$

با فرض اینکه در لحظه‌ی $t=0$ (مبدأ محوره‌ای مختصات فرضی)، نیروی $F1$ روی ریل از طریق چرخ اولین واگن، اعمال می‌گردد؛ و به دلیل کوچک بودن فاصله‌ی زمانی بین نیروهای اعمالی توسط دو چرخ مجاور ($t1=x/v$)، می‌توان این نیروها را به عنوان یک نیروی خطی پیوسته و با اندازه‌ی $F1$ فرض نمود. یعنی اینکه این نیروی خطی ثابت در مدت زمان $t1$ اعمال می‌گردد. بعد از گذشت زمان $t1$ ، نیروی اعمالی توسط چرخ‌های اولیه، قطع شده و تا زمان $t2$ که در واقع لحظه اعمال نیروی دو چرخ مجاور بعدی واگن اولیه می‌باشد، مقدار نیروی اعمالی صفر می‌باشد. لحظه $t2$ نیز مانند حالت اول، زمان شروع اعمال نیرو توسط دو چرخ بعدی واگن اول می‌باشد. مدت زمان اعمال این نیرو نیز از زمان $t2$ تا $t3$ می‌باشد. از لحظه $t3$ مجدداً اعمال نیرو توسط چرخ‌ها، قطع شده و تا زمان $t4$ نیرویی نخواهیم داشت. در واقع زمان $t4$ مدت زمان یک دوره کامل نیرو توسط چرخ واگن‌ها خواهد بود که بعد از این زمان، مجدداً چرخه اعمال نیرو، به طوری که در بالا بیان شد، ادامه می‌یابد. این نوع اعمال نیرو در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۷].



شکل (۳): ابعاد واگن‌های قطار و موقعیت نیروهای اعمالی به کف تونل [۲۷].

بنابراین تابع نیروی اعمالی برحسب زمان در بازه زمانی $t1$ تا $t4$ به صورت تابع ۵ است:

$$f(t) = \begin{cases} F1 & 0 < t < t1 \\ 0 & t1 < t < t2 \\ F1 & t2 < t < t3 \\ 0 & t3 < t < t4 \end{cases} \quad (5)$$

همانطور که اشاره شد تابع ارائه شده در رابطه‌ی بالا، تابع تناوبی با دوره تناوب $T=t4$ می‌باشد. تابع بار دینامیکی با محاسبه ضرایب سری فوریه و فرکانس‌های اصلی از صفر تا بینهایت قابل تعیین می‌باشد؛ اما بازه فرکانس بار دینامیکی قطار محدود می‌باشد. از آنجایی که قسمت عمده انرژی بار دینامیکی مربوط به فرکانس‌های نزدیک صفر می‌باشد؛ می‌توان از جملات ابتدایی سری فوریه به عنوان تابع نیروی دینامیکی قطار متحرک استفاده کرد، اما محدوده فرکانس بار دینامیکی ناشی از حرکت قطار منحصر به فرکانس‌های نزدیک صفر نیست و گاهی این محدوده تا صدها هرتز گسترش می‌یابد. مناسب‌ترین روش برای بررسی مشخصات بارهای دینامیکی، تبدیل حرکات ارتعاش از حوزه زمانی به حوزه فرکانس به کمک تبدیل فوریه می‌باشد.

براساس رابطه‌ی تبدیل فوریه، برای تبدیل تابع نیروی $f(t)$ به طیف دامنه فوریه، لازم است تعداد نامتناهی از توابع سینوسی و همه فرکانس‌های بین صفر و بی‌نهایت لحاظ شوند. الزام تئوریک فوق برای حالتی است که تابع $f(t)$ بر بازه نامتناهی از زمان تعریف شده باشد. در ادامه برای بحرانی‌ترین سرعت یعنی، ۸۰ کیلومتر بر ساعت زمان‌های مربوط به بازه‌های رابطه‌ی ۵ براساس $X=Vt$ و با توجه به آنکه فاصله‌ی بین دو محور چرخ مجاور قطار ۱/۵ متر است و همچنین فاصله‌ی بین دو محور در یک واگن برابر با ۱۶ متر و فاصله بین دو واگن برابر با ۰/۵ متر است می‌توان به راحتی مدت زمانی را که چرخ قطار بر روی ریل قرار دارد را محاسبه کرد. به عنوان مثال برای سرعت ۸۰ کیلومتر بر ثانیه این مقدار برای $t1=0/026$ s، $t2=0/719$ s، $t3=0/745$ s و $t4=0/902$ s است. پس از آن با استفاده از تبدیل فوریه فرکانس اصلی پس از همگرایی برابر با ۱۱/۲۶ هرتز، برای این سرعت و همچنین مقدار دامنه و زاویه‌ی فاز نیز براساس سری فوریه محاسبه شد.

۴-۲ عبور همزمان دو قطار

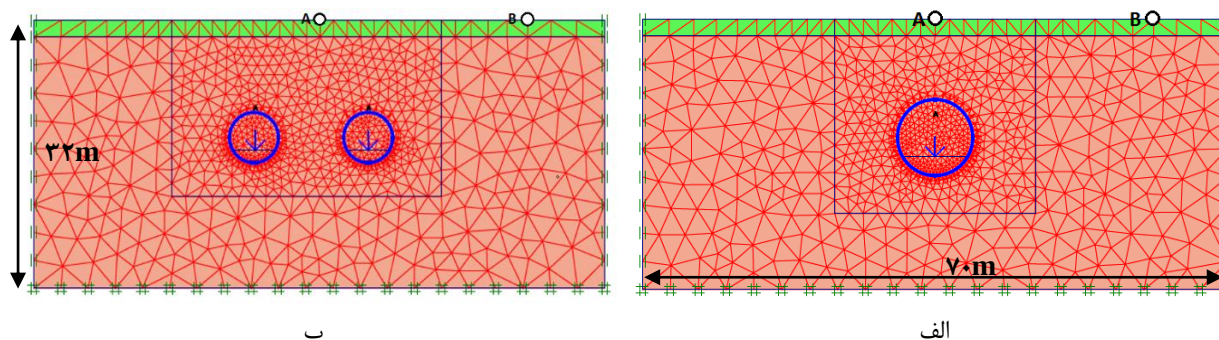
عبور دو قطار از کنار هم در تونل‌های منفرد مرتباً تکرار می‌شود، لذا عبور دو قطار از کنار هم می‌تواند سناریوهای مختلفی در مورد تابع نیرویی داشته باشد، لذا سعی شده است، محتمل‌ترین و بحرانی‌ترین حالت بررسی شود. با توجه به محاسبات حالت وجود یک قطار، سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت

$$f(t) = \begin{cases} F1 & 0 \prec t \prec t1 \\ 0 & t1 \prec t \prec t2 \\ F1 & t2 \prec t \prec t3 \\ 0 & t3 \prec t \prec t4 \\ F1 & t4 \prec t \prec t5 \\ 0 & t5 \prec t \prec t6 \\ F1 & t6 \prec t \prec t7 \\ 0 & t7 \prec t \prec t8 \end{cases} \quad f(t) = \begin{cases} 2 F1 & 0 \prec t \prec t1 \\ 0 & t1 \prec t \prec t2 \\ 2 F1 & t2 \prec t \prec t3 \\ 0 & t3 \prec t \prec t4 \end{cases} \quad f(t) = \begin{cases} F1 & 0 \prec t \prec t1 \\ 0 & t1 \prec t \prec t2 \\ F1 & t2 \prec t \prec t3 \\ 0 & t3 \prec t \prec t4 \end{cases} \quad f(t) = \begin{cases} F1 & 0 \prec t \prec t1 \\ 0 & t1 \prec t \prec t2 \\ F1 & t2 \prec t \prec t3 \\ 0 & t3 \prec t \prec t4 \\ F1 & t4 \prec t \prec t5 \\ 0 & t5 \prec t \prec t6 \\ F1 & t6 \prec t \prec t7 \\ 0 & t7 \prec t \prec t8 \end{cases}$$

6

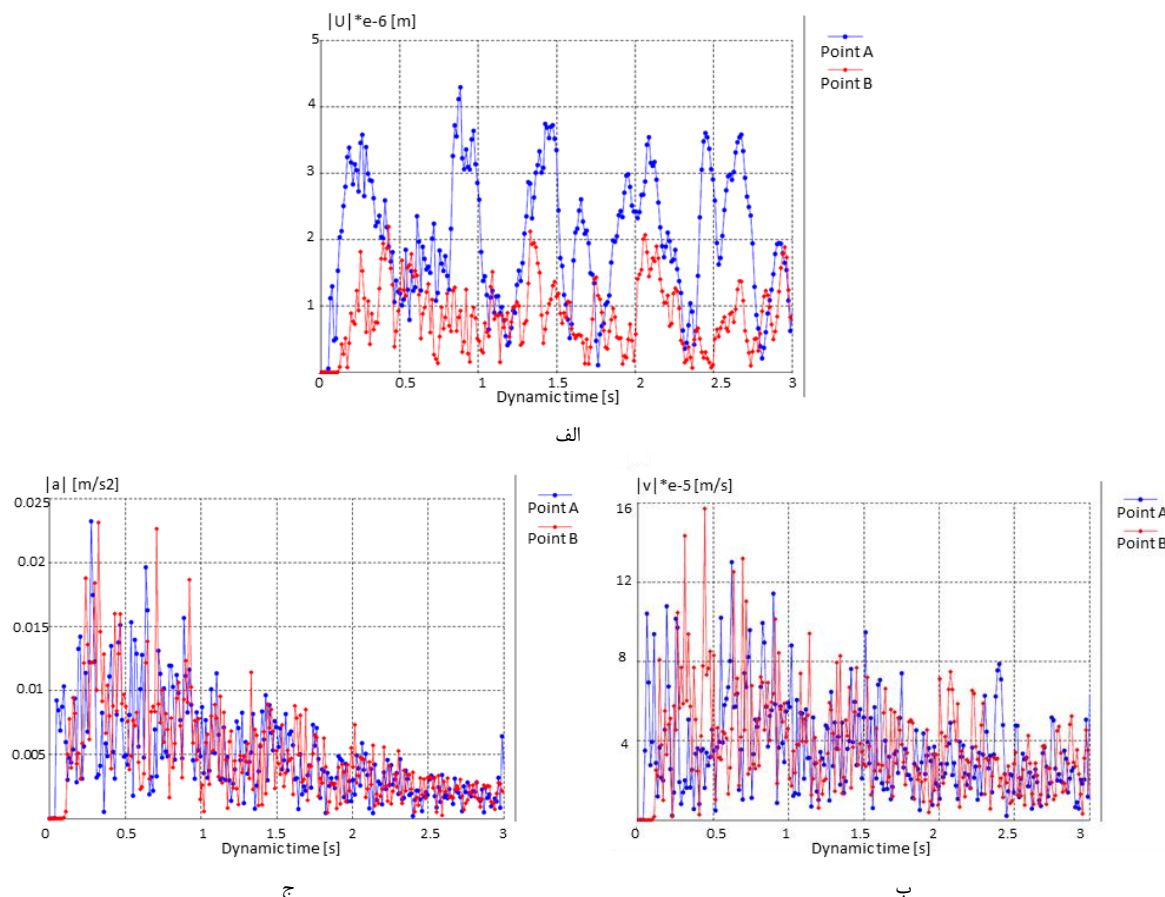
بودن در خروجی نتایج، بکار رفته است. بطور کلی می‌توان اینگونه بیان کرد که برای مدل‌سازی محیط از المان‌های دوبعدی مثلثی پانزده گره‌ای استفاده شده است [۲۸].

مطابق شکل ۶ در حالت تونل منفرد (Two track tunnel)، قطر ۹ متر و روباره ۹/۵ متر در نظر گرفته شد و برای حالت تونل دو قلو (Twin tunnel)، قطر ۶ متر و روباره مشابه در نظر گرفته شد، همچنین پایه‌ی بین تونل‌های دوقلو (Pillar) برابر با ۹ متر است. در مدل‌سازی از تاثیر حفاری تونل‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده صرف نظر شده و تنها به موضوع لرزش ناشی از عبور قطارها پرداخته شد. پس از حفاری تونل‌ها و بازسازی تغییر شکل‌های ناشی از حفاری تونل‌ها، تحلیل دینامیکی بدین صورت انجام شد که سه حالت، عبور یک قطار در تونل منفرد، عبور دو قطار از کنار هم در تونل منفرد و عبور یک قطار از تونل‌های دوقلو در نظر گرفته شده است. پایش در دو نقطه، بالای تونل منفرد (نقطه A) و فاصله‌ی ۲۷ متری از تونل منفرد (نقطه B) و برای تونل دوقلو (نقطه A) و فاصله‌ی ۲۷ متری (نقطه B) در نظر گرفته شد تا بتوان این دو حالت را با یکدیگر مقایسه کرد؛ شکل ۶ این نقاط را نشان می‌دهد.



شکل (۶): مدل ساخته شده برای (الف) تونل دو طرفه به صورت منفرد (ب) تونل یک طرفه به صورت دوقلو

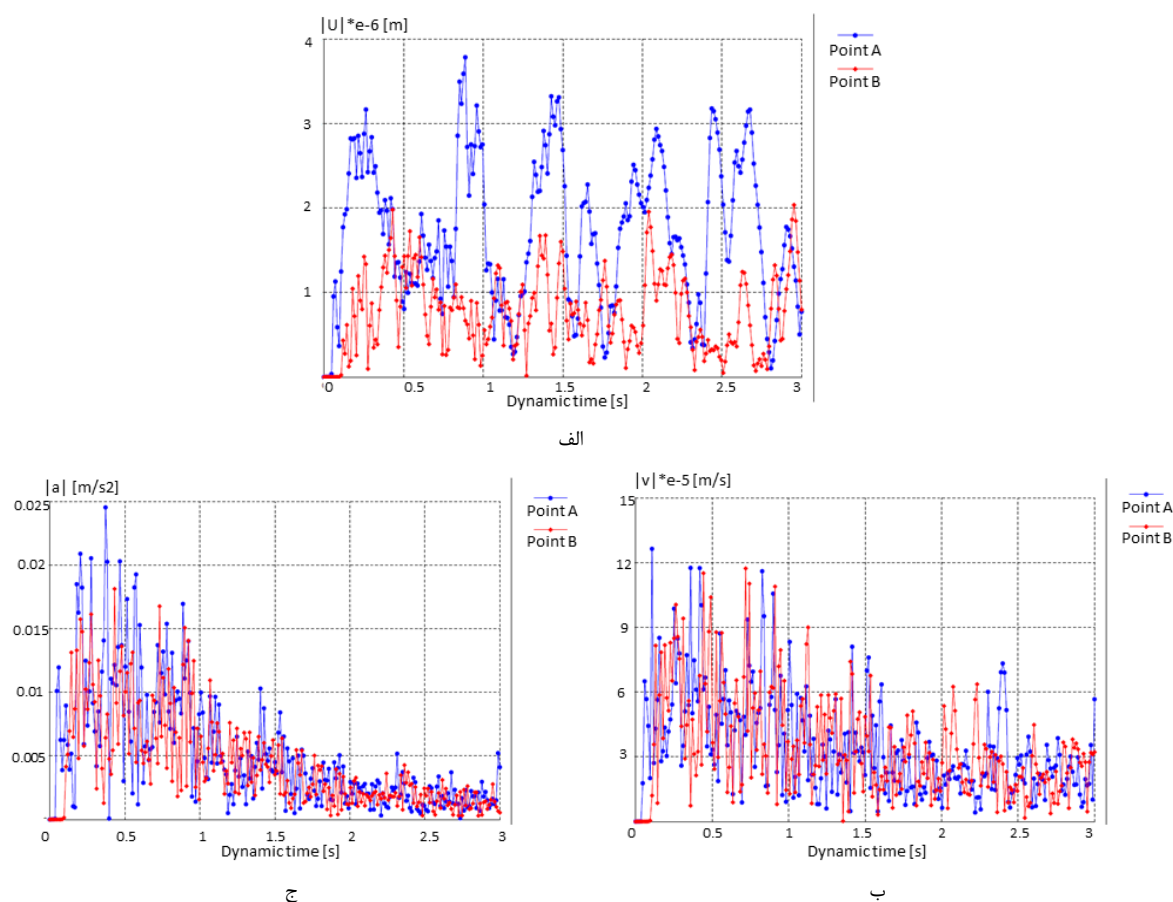
در حالت عبور یک قطار برای تونل منفرد از بیشترین سرعت که دارای بیشترین فرکانس است، یعنی سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت استفاده شده است. با توجه به سرعت، فرکانس، دامنه و زاویه فاز بدست آمده، تابع هارمونیک وارده به کف تونل بدست آمد و جابجایی، سرعت و شتاب در هر دو نقطه‌ی A و B، در شکل ۷ الف، ب و ج، پایش شد.



شکل (۷): پایش حالت عبور یک قطار برای تونل منفرد در دو نقطه‌ی A و B. (الف) جابجایی (ب) سرعت (ج) شتاب

همانطور که مشخص است زمانی که بارگذاری دینامیکی وارد می‌شود، جابجایی، سرعت و شتاب در مبدأ زمان برابر با صفر است و با اعمال بار قطار این مقادیر به ترتیب برابر با بیشینه مقدار $0/043$ میلی‌متر، $0/13$ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب 24 میلی‌متر بر مجذور ثانیه در نقطه‌ی A و برابر با مقدار $0/022$ میلی‌متر بر $0/16$ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب 23 میلی‌متر بر مجذور ثانیه برای نقطه B است. از نمودارهای نشان داده شده، می‌توان این نتیجه را استنتاج کرد که در اثر اعمال بار قطار، فرکانس‌های اعمالی توسط خاک در فاصله‌های دورتر میرا می‌شود و اصطلاحاً تأثیر عبور یک قطار از تونل منفرد بیشتر به صورت حوزه نزدیک (Near Field) عمل می‌کند و در حوزه‌ی دور (Far Field) تأثیر کمتری بر زمین می‌گذارد. توجه شود که نرخ میرایی در شتاب بسیار بیشتر از سرعت و جابجایی است.

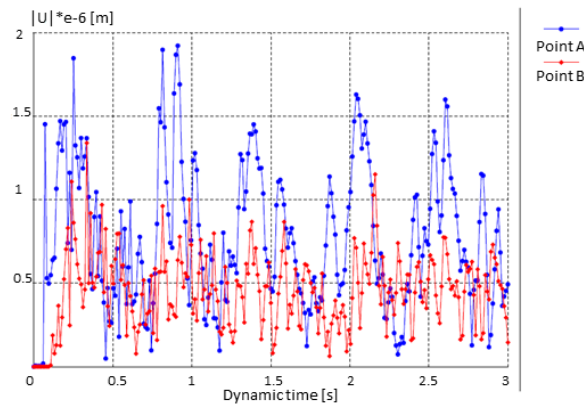
حالت بعدی مربوط به عبور دو قطار از کنار هم در تونل منفرد می‌باشد. با توجه به ۴ سناریوی مطرح شده، تمامی حالات در مدل عددی اعمال شد و بحرانی‌ترین حالت برای مقایسه انتخاب شد، بحرانی‌ترین حالت مربوط به بیشترین مقدار فرکانس، سناریوی ۳ است، در این حالت چرخ‌های هر دو قطار در یک زمان از کنار هم عبور می‌کنند. نتایج در نمودار شکل ۸ الف، ب و ج آورده شده است.



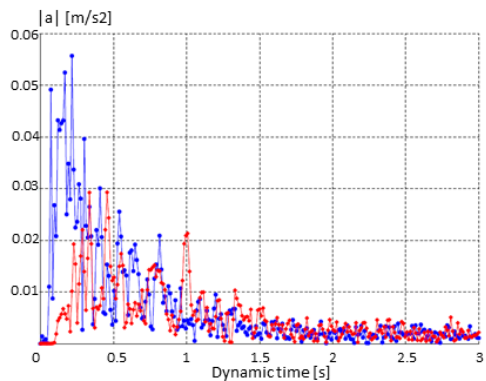
شکل (۸): پایش عبور دو قطار از کنار هم در تونل منفرد در دو نقطه‌ی A و B. الف) جابجایی ب) سرعت ج) شتاب

با اعمال بار دو قطار براساس سناریوی ۳ مقادیر به ترتیب برابر با بیشینه مقدار $0/038$ میلی‌متر، $0/14$ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب 25 میلی‌متر بر مجذور ثانیه در نقطه‌ی A و برابر با مقدار $0/02$ میلی‌متر، $0/12$ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب 17 میلی‌متر بر مجذور ثانیه در نقطه‌ی B است. با مقایسه‌ی حالت عبور یک قطار و دو قطار از تونل منفرد مشخص شد که فرکانس اصلی اعمالی رابطه‌ای غیرخطی با جابجایی، شتاب و سرعت دارد و مقدار جابجایی، شتاب و سرعت اندکی بیشتر از حالت قبل می‌شود.

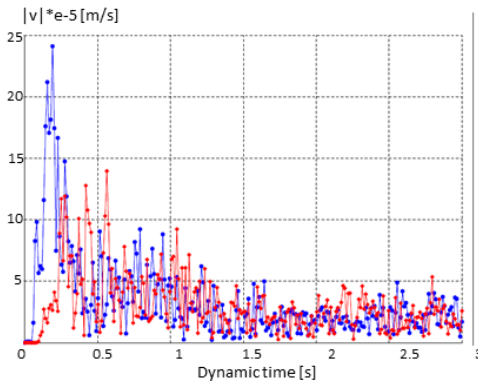
حالت بعدی مربوط به مدلسازی عبور قطار از تونل‌های دوقلو می‌باشد. در این حالت، عبور یک قطار با سرعت 80 کیلومتر بر ساعت و وزن 50 تن استفاده شده است، نتایج در نمودار شکل ۹ الف، ب و ج، آورده شده است.



الف



ج



ب

شکل (۹): پایش عبور عبور قطار از تونل‌های دوقلو در دو نقطه‌ی A و B. الف) جابجایی (ب) سرعت (ج) شتاب

با اعمال بار قطار در تونل‌های دوقلو، مقادیر به ترتیب برابر با ماکزیمم مقدار $0.018/0$ میلی‌متر، $0.24/0$ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب 55 میلی‌متر بر مجذور ثانیه در نقطه‌ی A و برابر با مقدار $0.014/0$ میلی‌متر، $0.14/0$ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب 30 میلی‌متر بر مجذور ثانیه در نقطه‌ی B است. تاثیر عبور قطار از تونل‌های دوقلو به صورت همزمان بیشتر به صورت حوزه نزدیک (Near Field) عمل می‌کند و در حوزه دور (Far Field) تاثیر کمتری بر زمین می‌گذارد. با مقایسه‌ی حالت عبور دو قطار از تونل منفرد با عبور همزمان دو قطار از تونل‌های دوقلو، مشخص است که جابجایی مقدار کمتری را نشان می‌دهد ولی سرعت و شتاب بیشتر می‌شود، این در حالی است که میرایی در سرعت و شتاب بسیار بیشتر از حالت منفرد است در حالی که شدت آن‌ها در ابتدای ورود قطار بسیار بیشتر است.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج نشان می‌دهد که عبور یک قطار از تونل منفرد، موجب ایجاد جابجایی، سرعت و شتاب در سطح زمین می‌شود، که در تونل مذکور زمانی که دو قطار به صورت همزمان از کنار یکدیگر عبور کنند، مقدار جابجایی، سرعت و شتاب در سطح زمین تفاوتی با حالت عبور یک قطار از این تونل نخواهد داشت. در مورد تونل‌های دوقلو (عبور یک قطار و یا دو قطار به صورت همزمان)، در مقایسه با تونل منفرد، مقادیر سرعت و شتاب به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد ولی جابجایی مقدار کمتری را نشان می‌دهد. عبور دو قطار از تونل منفرد، جابجایی کمتر و سرعت و شتاب بیشتری را نسبت به عبور همزمان دو قطار از تونل‌های دوقلو، در سطح زمین ایجاد می‌کند، این در حالی است که در عبور قطار از تونل‌های دوقلو، میرایی در سرعت و شتاب بسیار بیشتر از عبور قطار در تونل منفرد است. با مقایسه‌ی حالت عبور یک قطار و دو قطار از تونل منفرد مشخص شد که فرکانس اصلی اعمالی رابطه‌ای غیرخطی با جابجایی، شتاب و سرعت دارد. در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که تونل‌های دوقلو (در حالت عبور دو قطار با هم) مقدار سرعت و شتاب بیشتری را در سطح زمین نسبت به تونل منفرد (در حالت عبور دو قطار باهم) نشان می‌دهد.

مراجع

- [۱] Clough R. W., Penzien J.; *Dynamics of Structures*, 3rd Edition, Computers & Structures, Inc., Berkeley, 2003.
- [۲] Sheng X, Jones CJ, Thompson DJ. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. *Journal of Sound and Vibration*. 2006.
- [۳] Hanson, Carl E., David A. Towers, & Lance D. Meister. Transit noise and vibration impact assessment. No. FTA-VA-90-1003-

06. 2006.

[۴] Wang, J. N., & Munfakh, G. A., Seismic design of tunnels. WIT Transactions on the Built Environment, 57. , 2001.

[۵] گروه مهندسی سپاسد، مطالعات خط ۷ مترو تهران. ۱۳۹۲.

[۶] مهندسین مشاور ساحل، مطالعات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل خط ۷ مترو تهران. ۱۳۸۹.

[۷] Zhenguang, Pan Changshi Xie. "MEASUREMENT AND ANALYSIS OF VIBRATIONS CAUSED BY PASSING TRAINS IN SUBWAY RUNNING TUNNEL [J]." China Civil Engineering Journal 2, 1990.

[۸] Hood, R. A., R. J. Greer, M. Breslin, and P. R. Williams. "The calculation and assessment of ground-borne noise and perceptible vibration from trains in tunnels." Journal of Sound and Vibration 193, no. 1, 1996.

[۹] Melke, J. "Noise and vibration from underground railway lines: proposals for a prediction procedure." Journal of Sound and Vibration 120, no. 2, 1988.

[۱۰] Trochides, A. "Ground-borne vibrations in buildings near subways." Applied Acoustics 32, no. 4 (1991): 289-296.

[۱۱] Kurzweil, L. G. "Ground-borne noise and vibration from underground rail systems." Journal of Sound and Vibration 66, no. 3, 1979.

[۱۲] Metrikine, A. V., and A. C. W. M. Vrouwenvelder. "Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two-dimensional model." Journal of Sound and vibration 234, no. 1, 2000.

[۱۳] Balendra, T., C. G. Koh, and Y. C. Ho. "Dynamic response of buildings due to trains in underground tunnels." Earthquake engineering & structural dynamics 20, no. 3, 1991

[۱۴] Forrest, J. A., and H. E. M. Hunt. "A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration." Journal of Sound and Vibration 294, no. 4, 2006.

[۱۵] Balendra, T., K. H. Chua, K. W. Lo, and S. L. Lee. "Steady-state vibration of subway-soil-building system." Journal of engineering mechanics 115, no. 1, 1989.

[۱۶] Thiede, R., H. G. Natke. "The influence of thickness variation of subway walls on the vibration emission generated by subway traffic." In Soil Dyn Earthquake Eng V: Int. Conf Soil Dyn Earthquake Eng, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, pp. 673-682. 1991.

[۱۷] Chua, K. H., K. W. Lo, and T. Balendra. "Building response due to subway train traffic." Journal of Geotechnical Engineering 121, no. 11, 1995.

[۱۸] Andersen, Lars, and C. J. C. Jones. "Coupled boundary and finite element analysis of vibration from railway tunnels—a comparison of two-and three-dimensional models." Journal of sound and vibration 293, no. 3, 2006.

[۱۹] Degrande, Geert, Didier Clouteau, Ramzi Othman, Maarten Arnst, Hamid Chebli, Ralf Klein, Pranesh Chatterjee, and Bram Janssens. "A numerical model for ground-borne vibrations from underground railway traffic based on a periodic finite element–boundary element formulation." Journal of Sound and Vibration 293, no. 3, 2006

[۲۰] Gardien, W., H. G. Stuit. "Modelling of soil vibrations from railway tunnels." Journal of Sound and Vibration 267, no. 3, 2003.

[۲۱] HH Hung, YB Yang, "A review of researches on ground-borne vibrations with emphasis on those induced by trains." In Proc. Nat. Sci. Council Part A: Phys. Sci. & Eng, vol. 25, no. 1, pp. 1-16. 2001.

[۲۲] Yang, Yeong-Bin, Jong-Dar Yau, and Lin-Ching Hsu. "Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds." Engineering structures 19, no. 11, 1997.

[۲۳] Milne DR, Le Pen LM, Thompson DJ, Powrie W. Properties of train load frequencies and their applications. Journal of Sound and Vibration; 397:123-40. 2017.

[۲۴] Costa PA, Calçada R, Cardoso AS. Track–ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5 D FEM-BEM model. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 32(1):111-28. 2012.

[۲۵] Ntotsios E, Thompson D, Hussein M. The effect of track load correlation on ground-borne vibration from railways. Journal of Sound and Vibration. 402:142-63. 2017.

[۲۶] Zill, Dennis, Warren S. Wright, and Michael R. Cullen. Advanced engineering mathematics. Jones & Bartlett Learning, 2011.

[۲۷] طعنه گنبدی، بهرام، صدقیانی، محمدحسین، میرجلیلی، امیر؛ بررسی اثر ارتعاشی حرکت قطار در تونل های زیرزمینی بر روی سازه های سطحی (مورد مطالعه: خط ۱ متروی تبریز)؛ اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی، ۱۳۹۲

[۲۸] Vermmer, A., Brinkgreve, R. (Eds.),Plaxis 3D Tunnel 1.2, User's Manuals. In: Rotterdam, a.a. Balkema edition, Inc. 2001.