

شبیه سازی بار دینامیک قطار و بررسی تاثیر آن بر میزان لرزش سطح زمین

مرتضی احمدی، دانشیار، دانشکده فنی - مهندسی، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
حمید هاشم الحسینی، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
حمیدرضا نجاتی (نویسنده مسئول)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی - مهندسی، گروه مهندسی مکانیک سنگ،

دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: nejatihmd@gmail.com

چکیده

یکی از پیامدهای زیست محیطی تونل‌های شهری، ایجاد لرزش در سطح زمین است که در برخی موارد می‌تواند آزار دهنده نیز باشد. هدف از این مطالعه شبیه سازی بار دینامیک ناشی از حرکت قطار و بررسی تاثیر آن بر لرزش سطح زمین است. برای این منظور ابتدا لازم است بار قطار شبیه سازی شده و اثر آن بر روی میزان لرزش سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه، عوامل موثر بر بزرگی و فرکانس بار دینامیکی قطار مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات نیروی قائم اعمالی از طرف واگن به ریل در یک مدل طولی از واگنها، بر حسب زمان، تعیین شده است. سپس تابع بار ناشی از حرکت قطار بر حسب فرکانس محاسبه شده و به کمک طیف دامنه فوری، محدوده فرکانس بار شناسایی شده است. در مرحله بعدی با فیلتر کردن فرکانسهای دارای انرژی کمتر در محدوده فرکانسی بار، بار دینامیکی قطار به صورت نقطه ای به مدل عددی تونل (خط ۴ مترو تهران) اعمال شده است. به این ترتیب میزان لرزش سطح زمین به صورت نگاشتهای شتاب و سرعت مشخص شده است. مدلسازی انجام شده نشان می دهد که حداکثر لرزش سطح زمین در محدوده خط ۴ مترو تهران، در اثر حرکت همزمان دو قطار با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت که وزن هر واگن آن ۱۰۰ تن است، برابر ۸۴ دسی بل است که این مقدار می‌تواند برای ساکنان این منطقه آزاردهنده باشد.

واژه‌های کلیدی: حرکت قطار، لرزش زمین، تبدیل فوری، فرکانس بار، تونل راه آهن

۱. مقدمه

وزن قطار و سرعت قطار، تابع بار دینامیکی قطار تعیین شده و با اعمال آن به مدل عددی میزان لرزش محیط اطراف تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. انواع مدل های دینامیکی حرکت قطار

بررسی و مطالعه دینامیک حاکم بر حرکت قطار تحت سه نوع مدل دینامیکی طولی، جانبی و عمودی امکان پذیر است. اگر چه ترکیب این مدلها نیز امکان پذیر است، ولی در این صورت مدل مذکور بسیار پیچیده می شود. از آنجایی که زمان محاسبه و حل مدل یکی از فاکتورهای مهم است تا آنجا که ممکن است باید مدلها ساده شوند [Garg & Vukkipati, 1984]. در این مطالعه ابتدا در مدل طولی نیروی اعمال شده از طرف قطار به کف محاسبه شده و سپس همین نیرو در مدل عددی به صورت بار نقطه ای به کف مدل اعمال می شود.

۲-۱ مدل طولی واگنها

اگر ابعاد واگنهای قطار و جهت حرکت آنها مطابق شکل ۱-الف در نظر گرفته شود، با داشتن اطلاعات زیر می توان نمودار مربوط به نیروهای اعمال شده توسط چرخ واگنها را به شرحی که در زیر خواهد آمد، ترسیم نمود.

$$L = 22(m) \text{ طول یک واگن}$$

$$V = 80(m/s) \text{ سرعت حرکت قطار}$$

$$X_1 = 0.6(m) \text{ فاصله بین دو واگن}$$

$$X = 1(m) \text{ فاصله بین محورهای دو چرخ مجاور هم}$$

$$W = 100(ton) \text{ وزن یک واگن به همراه مسافرین یا بار}$$

نیروی اعمال شده توسط یک چرخ واگن

$$F_1 = \frac{100 * 9.81}{8} = 122.625(KN)$$

با فرض اینکه در لحظه $t = 0$ (مبدأ محورهای مختصات فرضی) نیروی F_1 روی ریل از طریق اولین چرخ اولین واگن، اعمال می شود و به دلیل کوچک بودن فاصله زمانی بین نیروهای اعمالی توسط دو چرخ مجاور ($t_1 = \frac{X}{V}$)، می توان این نیروها را به عنوان یک نیروی خطی پیوسته ثابت و با اندازه F_1 فرض کرد، یعنی

لرزش زمین در اثر حرکت قطار در تونلهای زیرزمینی اثری مهم و شناخته شده است که در سالهای اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است. فرکانس لرزشهای ناشی از حرکت قطار در محدوده ۲-۲۰ هرتز قابل تغییر است، بنابراین این لرزشها می توانند پیامدهای مهم زیست محیطی به همراه داشته باشند [Sheng et al., 2006].

لرزشهای ایجاد شده در حمل و نقلهای زیرزمینی می توانند باعث ایجاد مزاحمت برای ساکنان مناطق مسکونی اطراف مسیر شده و یا سبب عملکرد نادرست دستگاهها و تجهیزات حساس آزمایشگاهی در مناطق شهری شود [Hussein & Hunt, 2007]. مطالعه پاسخ دینامیکی زمین، در برابر نیروی ناشی از حرکت قطار مورد توجه شاخه های مختلف مهندسی است. در سالهای اخیر با ورود قطارهای مسافربری سریع السیر و قطارهای باربری سنگین تر به سیستم حمل و نقل ریلی، اهمیت توجه به پاسخ زمین در برابر بارهای دینامیکی ناشی از حرکت قطار بیشتر شده است [Yuanqiang et al., 2008 and Galvin & Dominguez, 2007].

از آنجایی که حمل و نقل ریلی یکی از ایمن ترین سیستمهای حمل نقل است، افزایش سرعت قطارهای مورد استفاده در این سیستم، مورد توجه قرار گرفته است. به عبارت دیگر قطارهای سریع السیر را می توان واکنش راه آهن به نیاز بازار حمل و نقل برای زمان کمتر سفر دانست [شایانفر و انصاری، ۱۳۸۳]. در چنین شرایطی لازم است تا میزان تاثیر پذیری تونلهای زیرزمینی در برابر بار ناشی از حرکت قطار بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

پاسخ سازه خط، در برابر قطار متحرک وابسته به فاصله محور چرخها، وزن قطار و سرعت قطار است. این پارامترها از جمله موثرترین پارامترها هستند، ولی علاوه بر اینها، عوامل دیگری نظیر عیب و نقص چرخها (لنگی، عدم تعادل، زبری)، تنظیم نبودن موتور، شتاب مثبت و منفی قطار و ... بر میزان لرزش زمین اثر می گذارند [Cox & Wang, 2003 and Lars, 2003].

در این مطالعه با در نظر گرفتن سه پارامتر فاصله محور چرخها،

شبیه سازی بار دینامیک قطار و بررسی تاثیر آن بر میزان لرزش سطح زمین

بر اساس محاسبات انجام شده مشخص می شود که وزن قطار بر روی بزرگی، سرعت حرکت قطار بر روی فرکانس و فاصله محور چرخ ها بر روی بزرگی و فرکانس بار دینامیک قطار تاثیر می گذارد. همان طور که اشاره شد تابع ارائه شده در رابطه (۱) تابع تناوبی با دوره تناوب $T = t_4$ است. اگر تابع تناوبی مانند $f(t)$ با دوره تناوب T موجود باشد، این تابع را می توان با استفاده از فرمول سری فوریه به صورت تابعی در حوزه فرکانس و بر اساس توابع سینوسی و کسینوسی به صورت رابطه (۲) نمایش داد [Duffy, 2002].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (2)$$

که در آن a_0 ، a_n و b_n ضرایب سری فوریه هستند و بر اساس روابط زیر محاسبه می شوند.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^{t_4} f(t) dt$$

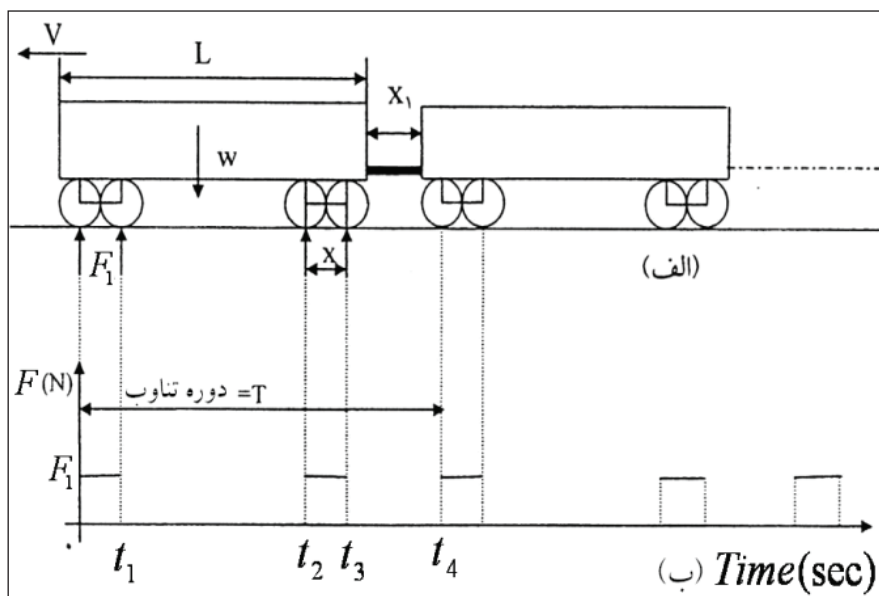
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_4} f(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_4} f(t) \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt$$

اینکه این نیروی خطی ثابت در مدت زمان t_1 اعمال می شود. بعد از گذشت زمان t_1 ، نیروی اعمالی توسط چرخهای اولیه، قطع شده و تا زمان t_2 که در واقع لحظه اعمال نیروی دو چرخ مجاور بعدی واگن اولیه است، مقدار نیروی اعمالی صفر است. لحظه t_2 نیز مانند حالت اول، زمان شروع اعمال نیرو توسط دو چرخ بعدی واگن اولیه است. مدت زمان اعمال این نیرو نیز از زمان t_2 تا t_3 است. از لحظه t_4 مجدداً اعمال نیرو توسط چرخها، قطع شده و تا زمان t_4 نیرویی نخواهیم داشت. در واقع زمان t_4 مدت زمان یک دوره کامل نیرو توسط چرخ واگنها خواهد بود که بعد از این زمان، مجدداً چرخه اعمال نیرو، به گونه ای که در بالا بیان شد، ادامه می یابد. این نوع روند اعمال نیرو در شکل ۱-ب نشان داده شده است.

بنابراین تابع نیروی اعمالی بر حسب زمان در بازه زمانی صفر تا t_4 به صورت رابطه (۱) ارائه می شود.

$$f(t) = \begin{cases} F_1 & 0 < t \leq t_1 \\ 0 & t_1 < t < t_2 \\ F_1 & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t_3 < t \leq t_4 \end{cases} \quad (1)$$



شکل ۱- الف. ابعاد واگنهای قطار و موقعیت نیروهای اعمالی و ب: تغییرات نیروی قائم اعمالی از طرف واگن به کف تونل [نجاتی، ۱۳۸۷].

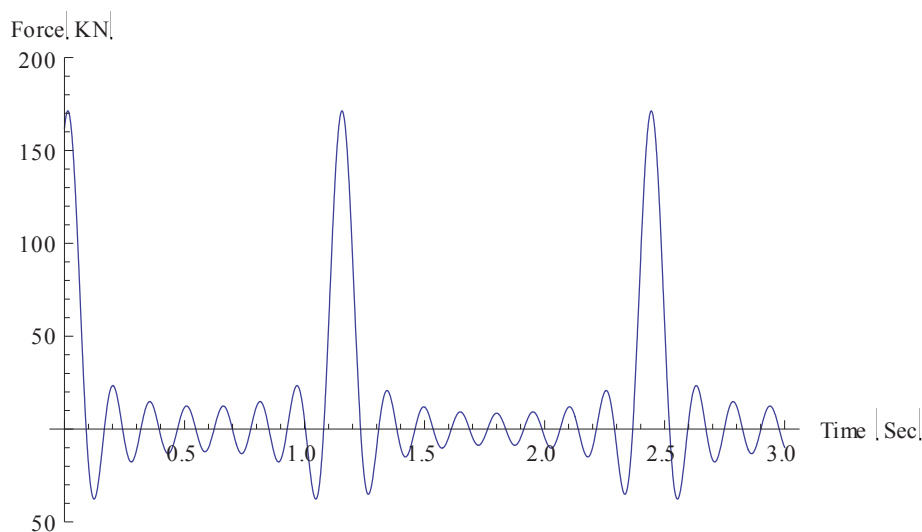
بر اساس رابطه (۴)، برای تبدیل تابع نیروی $f(t)$ به طیف دامنه فوریه، لازم است تعداد نامتناهی از توابع سینوسی و همه فرکانسهای بین صفر و بی نهایت مورد نظر قرار گیرند. الزام تئوریک فوق برای حالتی است که تابع $f(t)$ بر بازه نامتناهی از زمان تعریف شده باشد [Kappos, 2002]. اما از آنجایی که تابع بار دینامیکی بر روی بازه معینی از زمان تعریف شده است (زمانی که قطار به طور کامل از مبدا مختصات فرضی عبور کند) می توان تبدیل فوریه فوق را در زمانی محدود محاسبه نمود. لازم به ذکر است که تعداد کل واگنهای قطار ۱۰ واگن است، بنابراین زمان اعمال بار دینامیک به مدل عددی مربوط به عبور ۱۰ واگن است.

اگر چه طیف دامنه فوریه، به تنهایی توصیف کاملی از حرکات نامنظم زمین را ارائه نمی کند، ولی ابزار مناسبی برای مشخص کردن اهمیت نسبی فرکانسهای مختلف بارهای دینامیکی است [Kramer, 1996]. به عبارت دیگر بر اساس طیف دامنه فوریه می توان فرکانسهای معرف بیشترین انرژی موج را شناسایی کرده و از فرکانسهای دیگر چشم پوشی کرد. شکل ۳ طیف دامنه فوریه تابع بار دینامیک قطاری با سرعت ۸۰ km/h را نشان می دهد.

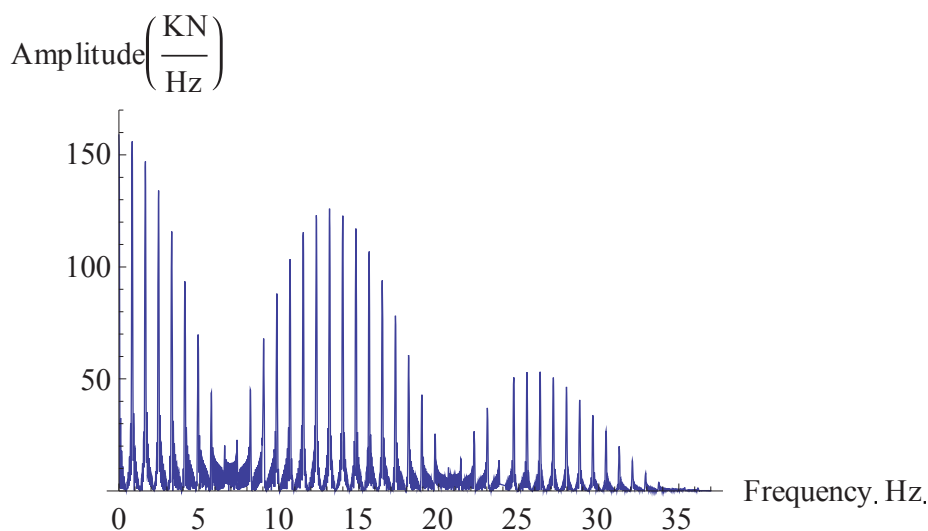
به این ترتیب تابع بار ناشی از حرکت قطار به راحتی برحسب فرکانس قابل محاسبه است.

تابع بار دینامیکی با محاسبه ضرایب سری فوریه و فرکانسهای اصلی از صفر تا بی نهایت قابل تعیین است، اما بازه فرکانس بار دینامیکی قطار محدود است. از آنجایی که قسمت عمده انرژی بار دینامیکی مربوط به فرکانسهای نزدیک صفر است [Metrikine & Vrouwenfelder, 2000]، می توان از جملات ابتدایی سری فوریه به عنوان تابع نیروی دینامیکی قطار متحرک استفاده کرد. در شکل ۲ منحنی تابع بار دینامیکی قطار تا شانزدهمین جمله سری فوریه در سرعت ۸۰ km/h (فرکانس کمتر از ۶ هرتز) و بر اساس مشخصات فرضی واگنها نشان داده شده است. اما محدوده فرکانس بار دینامیکی ناشی از حرکت قطار منحصر به فرکانسهای نزدیک صفر نیست و گاهی این محدوده تا صد هرتز گسترش می یابد [Sheng (et al.), 2006]. مناسب ترین روش برای بررسی مشخصات بارهای دینامیکی، تبدیل حرکات ارتعاش از حوزه زمانی به حوزه فرکانس به کمک تبدیل فوریه است. تبدیل فوریه تابع نیروی قطار $f(t)$ ، رابطه (۱) براساس رابطه (۴) قابل محاسبه است [Sheng (et al.), 2006].

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot \exp[-i\omega t] dt \quad (۴)$$



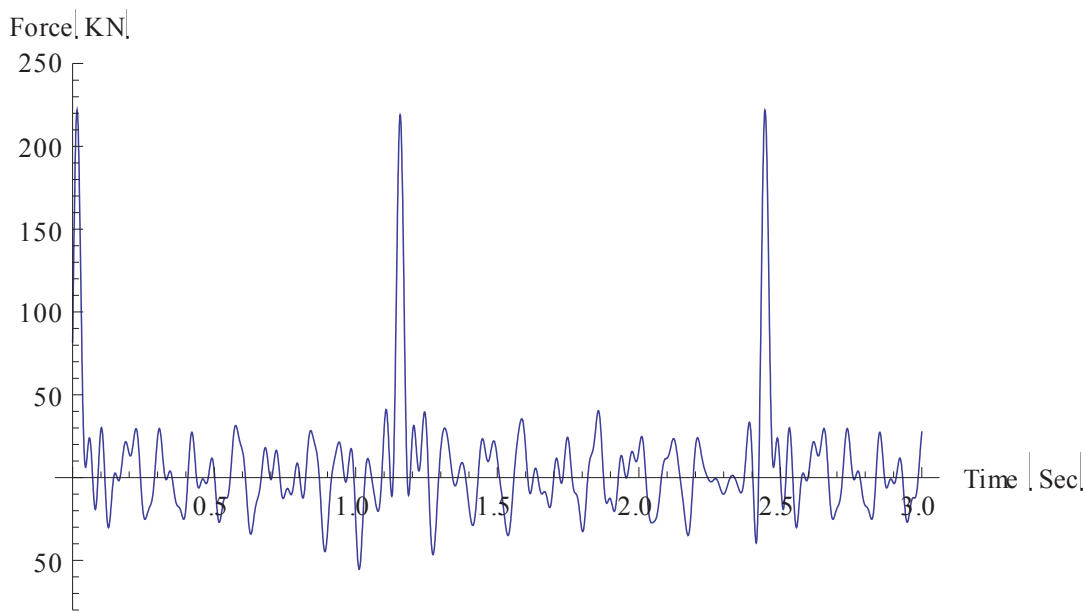
شکل ۲. منحنی تابع بار دینامیکی قطار تا شانزدهمین جمله سری فوریه در سرعت ۸۰ km/h (فرکانس کمتر از ۶ هرتز)



شکل ۳. طیف دامنه فوری تابع بار دینامیک قطار

قسمت عمده انرژی بار دینامیکی قطار مربوط به فرکانسهای جدا شده از طیف دامنه فوری است. حذف فرکانسهای کم انرژی به این دلیل صورت می گیرد که نرم افزار مورد استفاده در اعمال بار با حجم زیاد محدودیت داشته و همچنین زمان انجام محاسبات به شدت افزایش می یابد. شکل ۴ منحنی تابع بار دینامیکی مربوط به ۳۰ فرکانس جدا شده از طیف دامنه فوری را نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، دامنه فرکانسهای بیشتر از ۳۵ هرتز به شدت کاهش یافته و از مجموع ۷۵ فرکانس اصلی بار دینامیکی قطار در بازه [۰-۳۵] هرتز، ۳۰ فرکانس اصلی، دارای دامنه بیشتری نسبت به دامنه سایر فرکانسها هستند. مجموع جملات مربوط به این ۳۰ فرکانس به عنوان بار دینامیکی قطار در نظر گرفته شده و از سایر فرکانسهای موجود در طیف دامنه فوری چشم پوشی شده است. به عبارت دیگر



شکل ۴. منحنی تابع بار دینامیکی قطار، مربوط به ۳۰ فرکانس جدا شده از طیف دامنه فوری

۲-۲ مدل عددی

(لتیس، مش، شاتکریت) لاینینگ نهایی انجام می‌شود [شرکت مترو، ۱۳۸۵].

نگهداری تونل با حلقه های متشکل از میلگرد (لتیس) در نیم مقطع فوقانی و تهیه و نصب مش در ۲ لایه (پشت و رو) و بتن پاشی جداره تونل (شاتکریت خشک) با بتن عیار ۳۰۰ کیلو سیمان و در بعضی مراحل به تشخیص دستگاه نظارت با ۳۵۰ کیلو سیمان در هر متر مکعب انجام می‌شود.

پس از حفاری مقطع فوقانی و نصب و نگهداری اولیه جداره در طول تونل، شروع به حفاری نیم مقطع تحتانی کرده و حفاظتهای لازم و شاتکریت در تمام نیم مقطع تحتانی انجام می‌شود. عملیات حفاری نیم مقطع تحتانی با لودر یا بیل مکانیکی انجام می‌شود. مشخصات ژئومکانیکی خاک منطقه که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته اند در جدول ۱ نمایش داده شده است. در این جدول توزیع آماری و مقادیر پارامترهای فنی خاک توسط نرم‌افزار آماری SPSS و اطلاعات گمانه های موجود در مسیر تونل خط ۴ مترو تعیین شده است.

جدول ۱. توزیع آماری پارامترهای مکانیکی خاک [شرکت مترو، ۱۳۸۵]

| پارامتر | حداقل | میانگین | حداکثر |
|----------------------------|-------|---------|--------|
| مدول الاستیسیته MPa | ۴۲ | ۶۵ | ۸۸ |
| ضریب پواسون | ۰/۳ | ۰/۳ | ۰/۳ |
| چگالی Kg/m ³ | ۱۹۰۰ | ۲۰۰۰ | ۲۱۰۰ |
| چسبندگی KPa | صفر | ۱۱/۵ | ۴۷/۷ |
| مقاومت کششی | - | - | - |
| زاویه اصطکاک (درجه) | ۲۱ | ۳۸ | ۵۴ |

مقدار مقاومت کششی در جدول فوق موجود نیست که در تحلیلها صفر در نظر گرفته می‌شود. همان طور که اشاره شد عمق تونل خط ۴ بین ۹ تا ۱۳ متر است. در این مطالعه عمق تونل مدلسازی شده حدود ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین خواص نگهداری تونل در جدول ۲ نشان داده شده است.

به منظور مدل کردن لرزش زمین، مدل‌های متعدد ترکیبی، مرکب از تکنیکهای اجزاء محدود - اجزاء مرزی استفاده شده است. در این مدلها روش اجزاء محدود برای مدل کردن دیواره تونل استفاده شده در حالی که روش اجزاء مرزی برای مدل کردن محیط اطراف زمین (به صورت تک لایه یا چند لایه) استفاده می‌شود [Hussein & Hunt, 2007 and Andersen & Jones, 2006]. مدل ترکیبی اجزاء محدود - اجزاء مرزی را با مقایسه بین مدلسازی دو بعدی و سه بعدی برای تعیین لرزش زمین در اثر عبور قطار استفاده شده است. یک نتیجه مهم این مطالعه این بوده است که اگر چه لرزش زمین یک حرکت سه بعدی است، ولی با این حال مدل‌های دو بعدی ابزاری مناسب و سریع برای تعیین لرزش زمین به صورت کمی هستند.

یکی دیگر از روشهای مناسب برای تعیین لرزش زمین ناشی از حرکت قطارهای زیر زمینی روش تفاضل محدود است [Wolf, 2003]. مزیت این روش در مقایسه با دیگر روشهای عددی، کدنویسی راحت تر و سهل تر آن است [Taylor, 2004]. در این تحقیق برای بررسی میزان لرزش زمین در اثر حرکت قطار، تونل خط ۴ مترو تهران به کمک نرم افزار FLAC 2D مدلسازی شده و اثر بار قطار میزان لرزش سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. توصیف تونل مورد مطالعه

خط ۴ متروی تهران از شهرک اکباتان در غرب تهران آغاز شده و تا میدان کلاهدوز در منتهی الیه شرقی خیابان پیروزی ادامه می‌یابد. این خط در طول مسیرش از زیر ۲ خیابان مهم (خیابان آزادی و خیابان پیروزی) عبور می‌کند.

سازه تونل یک حلقه بیضوی شکل از بتن مسلح به عرض حدود ۹/۶۵ متر و ارتفاع ۸/۳۵ متر است که در عمق حدود ۹-۱۳ متری از سطح زمین طبیعی قرار دارد. روش حفاری و اجرای تونل روش اتریشی (NATM) در دو مرحله حفاری در دو بخش فوقانی و تحتانی تعیین شده است. بعد از عملیات حفاری و تحکیم اولیه

شبیه سازی بار دینامیک قطار و بررسی تاثیر آن بر میزان لرزش سطح زمین

جدول ۲. خواص و مشخصات لاینینگ تونل [شرکت مترو، ۱۳۸۵]

| پارامتر | پوشش سگمنتی | دوغاب سیمانی |
|---------------------------|-------------|--------------|
| مدول الاستیسیته (GPa) | ۳۰ | ۹ |
| ضریب پواسون | ۰/۲ | ۰/۲۵ |
| چگالی (Kg/m^3) | ۲۸۰۰ | ۲۴۰۰ |
| قطر داخلی (m) | ۸/۱۵ | ۸/۸۵ |
| قطر خارجی (m) | ۸/۸۵ | -- |

مسائل مهندسی از حالت ساده شده برای مدلسازی استفاده می شود. ساده سازی مدلها بستگی به هدف تحلیل دارد. به عنوان مثال اگر هدف اصلی، بررسی پاسخ محیط اطراف تونل راه آهن در برابر حرکت قطار باشد، در نظر گرفتن جزئیات تماس چرخ و ریل و عوامل مشابه که تنها اثرات موضعی دارند، بی معنی خواهد بود. بنابراین در مدل مورد مطالعه تنها نیروهای قائم ناشی از بار محوری چرخها در نظر گرفته شده و اثر آن بر محیط اطراف تونل مورد بررسی قرار می گیرد، زیرا سایر نیروهای اعمالی در مقایسه با نیروی بار محوری چرخها ناچیزند.

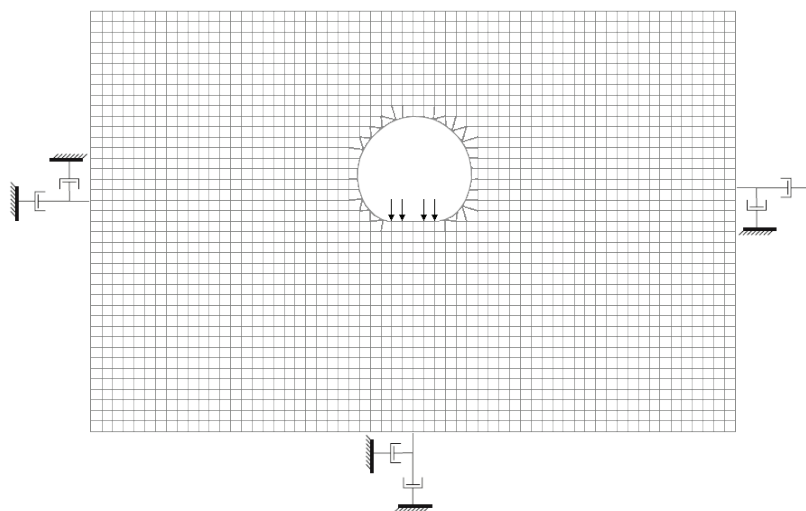
بارهای دینامیکی را می توان به صورت تاریخچه ای از شتاب، سرعت، تنش، و یا نیرو به مدل اعمال کرد. در این مطالعه تابع نیروی محاسبه شده از رابطه (۲) به عنوان تاریخچه نیرو به صورت بار نقطه ای، همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، به مدل اعمال می شود.

سیستمهای دینامیکی طبیعی در حال نوسان به دلیل وجود میرایی به تدریج انرژی خود را ازدست می دهند. میرایی یک سیستم در واقع افت انرژی است که در نتیجه اصطکاک داخلی مصالح و لغزش سطوح ضعف آن شکل می گیرد.

در مسائل حوزه زمان، معمولاً میرایی رایلی مورد استفاده قرار می گیرد که روی یک بازه محدود فرکانس، این میرایی تقریباً

۴. تحلیل دینامیکی

وسایل نقلیه راه آهن سیستمهای مکانیکی پیچیده ای هستند که با داشتن فنرها، میراکننده های خطی و غیرخطی، درجات آزادی زیادی دارند. حرکت قطار در مسیر راه آهن باعث ایجاد نیروهای سه بعدی می شود. این نیروها نیروهای قائم (بار قائم چرخها)، نیروهای طولی (نیروی ترمز و نیروی اعمالی در لحظه شروع حرکت) و نیروهای عرضی (نیروی گریز از مرکز و ضربه های جانبی) هستند [Fryba, 1996]. در نظر گرفتن همه نیروهای فوق در مدلسازی باعث پیچیده شدن مدل می شود و در اغلب



شکل ۵. مدل عددی تونل با شرایط مرزی ویسکوز و موقعیت نیروی اعمالی از طرف قطار بر کف تونل

۴-۱ لرزش سطح زمین

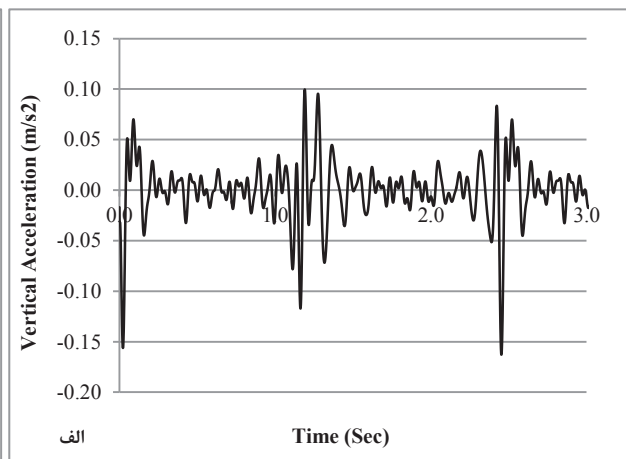
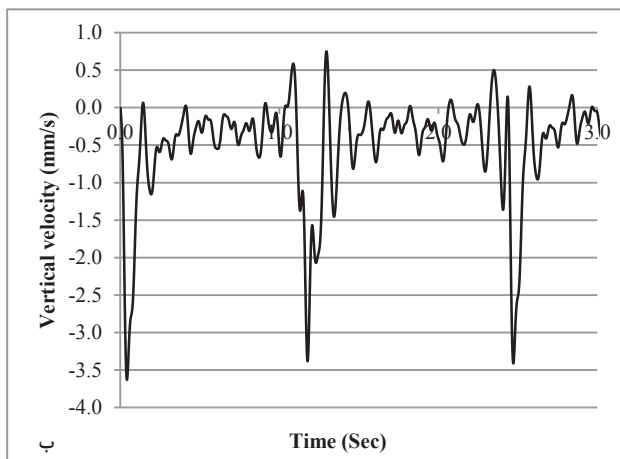
ارتعاش، یک حرکت نوسانی بوده که به صورت تغییر مکان، سرعت یا شتاب قابل بیان است. به علت نوسانی بودن حرکت ارتعاشی، هیچگونه حرکتی در المانهای ارتعاشی مشاهده نمی‌شود و میانگین حرکت مطلق ذرات و المانهای ارتعاشی صفر است. همچنین تغییر مکان آسان ترین روش تفسیر حرکت ارتعاشی است [FTA, 2006].

اگر چه درک و کاربرد تغییر مکان آسان تر از سرعت و شتاب است، اما این کمیت به ندرت در توضیح و تفسیر ارتعاشات زیر زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل اصلی آن هم استفاده مبدل‌های الکتریکی اندازه گیری ارتعاش از کمیت‌های سرعت و شتاب است و از طرفی پاسخ انسانها، سازه‌ها و سایر ابزار و وسایل به ارتعاش نیز با استفاده از کمیت‌های سرعت و شتاب به صورت دقیق تری قابل بیان است [FTA, 2006]. شکل ۶-الف و ۶-ب، به ترتیب نگاشت شتاب قائم و سرعت قائم نقطه ای در سطح زمین را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است مقدار بیشینه شتاب ذرات خاک در سطح زمین در اثر حرکت قطار ۱۵/۰ متر بر مجذور ثانیه بوده و مقدار سرعت ذرات خاک سطح زمین برابر ۵/۳ میلی متر بر ثانیه است. لازم به ذکر است که لرزش ایجاد شده در سطح زمین ناشی از حرکت دو قطار به طور همزمان و با

مستقل است. اگر چه تعیین میرایی محیط به راحتی امکان پذیر نیست، ولی براساس تجربه مقدار میرایی مصالح ژئوتکنیکی، ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته می‌شود [Gardien & Stuit, 2003]. در این مطالعه مقدار میرایی محیط ۳ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است.

در بسیاری از مطالعات دینامیکی سازه‌ها نظیر سدها و تونلها، فرکانسهای حساس مربوط به ارتعاش در فرکانس طبیعی سیستم است. بنابراین لازم است تا فرکانس طبیعی سیستم برای اعمال در میرایی رایلی محاسبه شود. فرکانس طبیعی سیستم مورد مطالعه که با اعمال ناگهانی نیروی ثقل به مدل عددی در حالت بدون میرایی و ثبت تاریخچه حرکت قائم محاسبه شده است، ۱ هرتز است. در مدلسازی مسائل ژئومکانیکی لازم است تا ابعاد مدل با مرزهای مصنوعی محدود شود. وجود این مرزها در مسائل دینامیکی سبب می‌شود که امواج برخوردی به مرزها منعکس شده و دوباره وارد مدل شود. استفاده از مدل‌های بزرگ با توجه به میرایی زیاد امواج در حین انتشار می‌تواند از خطای محاسبات بکاهد، اما چنین راه حلی منجر به افزایش زمان محاسبات می‌شود و عملاً کارآیی چندانی نخواهد داشت. برای رفع این مشکل استفاده از مرزهای ویسکوز پیشنهاد می‌شود. این روش مبتنی بر استفاده از میراگرهای عمودی و برشی در مرزهای مدل است که انرژی امواج برخوردی را جذب و از بازتاب آن به داخل موج جلوگیری می‌نماید [Itasca, 2000].



شکل ۶. نگاشت لرزش نقطه ای در سطح زمین، الف: نگاشت شتاب قائم، ب: نگاشت سرعت قائم

شبیه سازی بار دینامیک قطار و بررسی تاثیر آن بر میزان لرزش سطح زمین

۶- الف) و بر اساس رابطه زیر محاسبه کرد [FTA, 2006].

$$rms = \left[\frac{\sum v_n^2}{N} \right]^{0.5} \quad (5)$$

که در آن v_n سرعت ذره نمونه گیری شده با فرکانس نمونه گیری f_s است. همچنین $N = (t_1 - t_2) f_s$ است. به این ترتیب بزرگی سرعت مجذور میانگین مربعات $8.6 \times 10^{-4} m/s$ برابر به دست می آید.

بنابراین بر اساس استاندارد، مقدار لرزش سطح زمین در اثر حرکت همزمان دوقطار با سرعت 80 کیلومتر بر ساعت که وزن هر واگن آن 100 تن است، در محدوده خط 4 مترو تهران به صورت زیر تعیین می شود:

$$L_V = 20 \times \log_{10} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{8.6 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-8}} \right) = 84 \text{ dB}$$

بر این اساس مقدار بزرگی سرعت لرزش سطح زمین 84 دسی بل است. در شکل ۷ سطوح معمول ارتعاش سطح زمین نشان داده شده است.

سرعت 80 کیلومتر بر ساعت است.

میزان لرزش ناشی از سیستمهای حمل و نقل را می توان با کمیتهای مختلف تفسیر کرد. یکی از معروف ترین این کمیتهای دسی بل است. دسی بل یک واحد لگاریتمی برای بیان نسبت یک کمیت فیزیکی به یک مقدار مرجع مشخص است. از آنجایی که دسی بل نسبت دو کمیت فیزیکی با یکای یکسان، بی بعد است، بزرگی سرعت ارتعاش به دسی بل با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [FTA, 2006].

$$L_V = 20 \times \log_{10} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right) \quad (4)$$

که در آن L_V بزرگی سرعت به دسی بل، V بزرگی سرعت مجذور میانگین مربعات V_{ref} بزرگی سرعت مرجع است. بزرگی سرعت مرجع بر اساس نوع استاندارد تعیین می شود. به عنوان نمونه مقدار V_{ref} در استانداردهای معمول، برابر $5 \times 10^{-8} m/s$ در نظر گرفته می شود. مقدار سرعت مجذور میانگین مربعات را می توان با استفاده از نگاشت سرعت ذرات سطح زمین (شکل



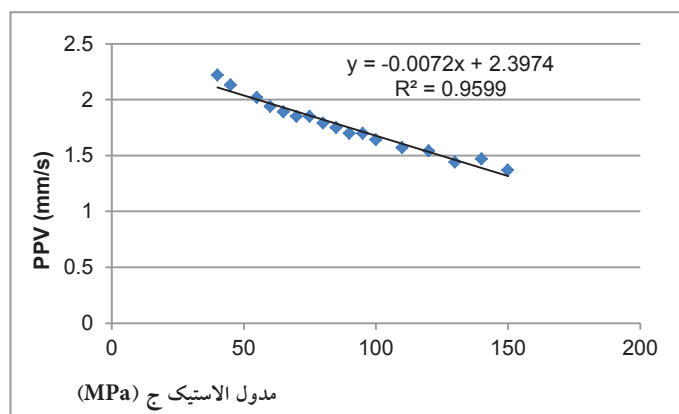
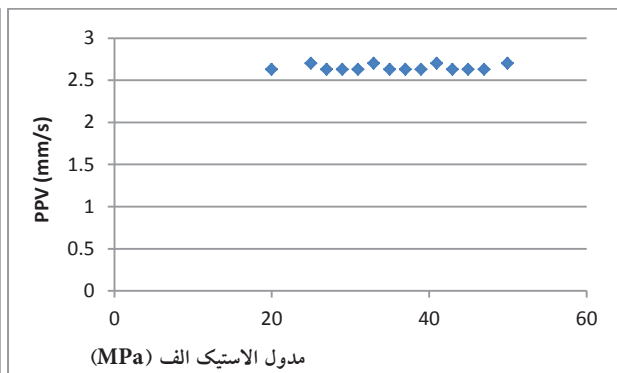
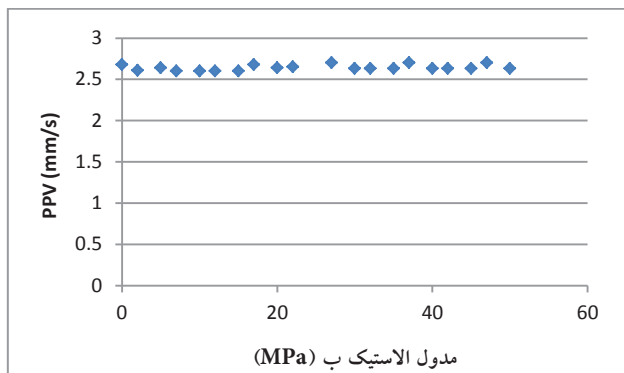
شکل ۷. سطوح مختلف ارتعاش زمین بر حسب دسی بل [FTA, 2006].

ژئومکانیکی متفاوت ساخته شده تا تاثیر هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی بر روی میزان لرزش سطح زمین تعیین شود. در شکل‌های ۸-الف تا ج تغییرات بیشینه سرعت قائم در سطح زمین در اثر تغییر پارامترهای ژئومکانیکی خاک نشان داده شده است. برای بررسی تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی خاک بر میزان لرزش سطح زمین، بیشینه سرعت ذرات^۲ سطح زمین در جهت قائم به عنوان شاخص میزان لرزش سطح زمین در نظر گرفته شده و تغییرات آن نسبت به تغییر مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک و چسبندگی مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده است افزایش مدول الاستیسیته خاک روی سرعت لرزش ذرات خاک در سطح زمین تاثیر گذاشته و با افزایش مدول الاستیسیته میزان لرزش سطح زمین کاهش می یابد. این در حالی است که تغییر پارامترهای موهر کولمب (زاویه اصطکاک و چسبندگی) بر روی میزان لرزش سطح زمین بی تاثیر است. این

همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است مقدار لرزش ۸۴ دسی بل می تواند برای ساکنین منطقه ناراحتی ایجاد کند. البته این مسئله تنها در مواردی اتفاق می افتد که دو قطار که وزن هر واگن آنها ۱۰۰ تن است با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت به طور همزمان از یک مقطع عبور کنند. بنابراین اگر وزن یا سرعت قطار کمتر بوده و یا فقط یک قطار از مقطع مورد نظر عبور کند میزان لرزش سطح زمین کاهش می یابد.

۴-۲ تحلیل حساسیت

همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است در محدوده خط ۴ مترو تهران پارامترهای ژئومکانیکی خاک منطقه تغییراتی دارند. در تحلیل ارائه شده در بخش قبل، از مقادیر میانگین این پارامترها استفاده شده است. در این بخش برای تعیین حساسیت هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی خاک منطقه مدل‌های متعددی با خاصیت



شکل ۸. تغییرات بیشینه سرعت قائم در سطح زمین در اثر تغییر پارامترهای ژئومکانیکی خاک

شبیه سازی بار دینامیک قطار و بررسی تاثیر آن بر میزان لرزش سطح زمین

با افزایش مدول الاستیسیته خاک اطراف تونل، میزان لرزش سطح زمین کاهش می یابد. این در حالی است که تغییر پارامترهای موهر کولمب (زاویه اصطکاک و چسبندگی) بر روی میزان لرزش سطح زمین بی تاثیر است. بار القایی ناشی از حرکت قطار آن قدر زیاد نیست که بتواند جابجایی پلاستیک در محیط اطراف تونل ایجاد کند و در واقع جابجایی توده خاک اطراف تونل، محدود به جابجایی های الاستیک است. برای مطالعه میزان لرزش ناشی از حرکت قطار می توان از مدل رفتاری الاستیک استفاده کرد و نیازی به حل پلاستیک مساله نیست.

۶. پی نوشتها

- 1- Root Means Square
- 2- Peak Particle Velocity (PPV)

۷. مراجع

- شایانفر، م. و انصاری، م. (۱۳۸۳) "تحلیل دینامیکی پلهای راه آهن در خطوط مخصوص قطارهای سریع"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال اول، شماره اول، ص ۳۵-۴۹.

- شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو) (۱۳۸۵) "مشخصات فنی احداث تونل توسعه خط ۴ متروی تهران"، تهران، مترو.

- نجاتی، حمیدرضا (۱۳۸۷) "تحلیل دینامیکی تونلهای راه آهن" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

- Andersen, L. and Jones, C. J. C. (2006) "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, pp. 611-625.

- Cox, S.J. and Wang, A. (2003) "Effect of track stiffness on vibration levels on railway tunnels", Journal of Sound and Vibration, 267, pp. 565-573.

مسئله به این دلیل است که بار القایی ناشی از حرکت قطار آن قدر زیاد نیست که بتواند جابجایی پلاستیک در محیط اطراف تونل ایجاد کند و در واقع جابجایی توده خاک اطراف تونل، محدود به جابجایی های الاستیک است. بنابراین، در این شرایط تغییر پارامترهای پلاستیک خاک، تغییری در میزان لرزش سطح زمین ایجاد نمی کند. با این توصیف می توان برای مطالعه میزان لرزش ناشی از حرکت قطار از مدل رفتاری الاستیک استفاده کرد.

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه با شبیه سازی حرکت قطار، تاثیر بار دینامیکی قطار بر لرزش محیط اطراف تونل راه آهن مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه را می توان به صورت زیر بیان کرد:

محدوده فرکانس بار دینامیکی ناشی از حرکت قطار تا صد ها هرتز گسترش می یابد و هر چه سرعت قطار افزایش پیدا کند محدوده فرکانسی بار نیز گسترش می یابد.

افزایش سرعت قطار باعث کاهش دوره تناوب بار دینامیک قطار می شود. به عبارت دیگر باعث افزایش فرکانس بار ایجاد شده توسط قطار می شود که این مسئله باعث افزایش توان لرزه ای در سطح زمین می شود.

برای تعیین بار دینامیکی قطار می توان از نیروی اینرسی و گریز از مرکز که به صورت موضعی بر سیستم وارد می شوند و مقدار آنها در مقایسه با بار قائم ناچیز است، چشم پوشی و تنها بار قائم چرخها را با در نظر گرفتن فاصله محور چرخ ها، وزن قطار و سرعت قطار محاسبه کرد.

مقدار بیشینه شتاب ذرات خاک در سطح زمین در اثر حرکت قطار ۰/۱۵ متر بر مجذور ثانیه بوده و مقدار سرعت ذرات خاک سطح زمین برابر ۳/۵ میلی متر بر ثانیه است.

مقدار لرزش سطح زمین در محدوده خط ۴ مترو تهران، در اثر حرکت همزمان دو قطار با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت که وزن هر واگن آن ۱۰۰ تن است برابر ۸۴ دسی بل است که این مقدار می تواند باعث ایجاد ناراحتی برای ساکنین این مناطق شود.

- Lars, H. (2003) "Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, pp. 403–413.
- Metrikine, A.V. and Vrouwenvelder, A. C. W. M. (2000) "Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: Two-dimensional model", *Journal of Sound and Vibration*, 234(1), pp. 43-66.
- Sheng, X. Jones, C. J. C. and Thompson, D. J. (2006) "Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods", *Journal of Sound and Vibration* 293, pp. 575–586.
- Thornely-Taylor, R. M. (2004) "The prediction of vibration, ground-borne and structure-radiated noise from railways using finite difference method- part 1-theory", *Proceeding of the Institute of Acoustics* 26 (2), pp. 69–79.
- Wolf, S. (2003) "Potential low frequency ground vibration (<6.3 Hz) impacts from underground Lrt operations", *Journal of Sound and Vibration* 267, pp. 651–661.
- Yuanqiang, C., Honglei, S. and Changjie, X. (2008) "Response of railway track system on poroelastic half-space soil medium subjected to a moving train load", *International Journal of Solids and Structures*, Article in Press.
- Dean, G. Duffy (2002) "Advanced engineering mathematics", CRC Press.
- Fryba, L. (1996) "Dynamics of railway bridges", London, Thomas Telford.
- FTA (Federal Transit Administration) (2006) "Transit noise and vibration impact assessment", Department of Transportation, USA.
- Galvin, P. and Dominguez, J. (2007) "Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31, pp. 931–941.
- Gardien, W. and Stuit, H.G. (2003) "Modelling of soil vibrations from railway tunnels", *Journal of Sound and Vibration*, 267, pp. 605–619.
- Garg, V. K. and Vukkipati, R.V. (1984) "Dynamics of railway vehicle systems", Academic Press.
- Hussein, M. F. M. and Hunt, H. E. M. (2007) "A numerical model for calculating vibration from a railway tunnel embedded in a full-space", *Journal of Sound and Vibration*, 305, pp. 401–431.
- Itasca Consulting Group (2000) "Flac Version 4.0 User's Manual", Minneapolis, USA.
- Kappos, A.J. (2002) "Dynamic loading and design of structures", Spon Press.
- Kramer, S.L. (1996) "Geotechnical earthquake engineering", UK, Prentice Hall.