

# مقایسه تاثیر خاک ریزدانه و درشت دانه زیر ساختمان بر ساختمانهای مجاور خطوط آهن بر اثر ارتعاشات قطار

علیرضا آقائی فر<sup>i</sup>; محمد علی رضوانی<sup>ii</sup>; علی ملاحسنی

## چکیده

در تحقیق حاضر اثرات ارتعاشات ریلی منتقل شده از زمین بر سازه ساختمانهای مجاور خطوط آهن بررسی شده است. به عنوان مطالعه موردی، ساختمان هفت طبقه بتنی تالار شهر مشهد با کاربری فرهنگی و اداری که در مجاورت و بالای نزدیکترین ایستگاه قطار شهری به حرم مطهر (که در آینده تکمیل خواهد شد) بررسی شده است. به این منظور ورودی نرم افزار یکی از منحنیهای موجود در متن استاندارد ISO 14837-1 به صورت منحنی خام استفاده شده که با تبدیلهای ریاضی آماده ورود به نرم افزار مورد نظر گردید. نتایج مدل نرم افزاری نشان می‌دهد که ارتعاشات آنی ناشی از عبور قطارها از ایستگاه بر ساختمان تالار شهر مشهد تاثیر قابل ملاحظه ای ندارد.

در مرحله دوم یک ساختمان فرضی یک طبقه با سازه‌ی بتنی به عنوان ساختمان مربوط به ایستگاه راه آهن بین شهری در دو حالت که خاک زیر ساختمان درشت دانه و ریز دانه باشد، مدل شد. با توجه به محاسبات نرم افزاری مشابه مدل فوق الذکر، مشخص شد که در صورت درشت دانه بودن خاک زیر ساختمان، احتمال آسیب سازه‌ای به ساختمان وجود دارد، اما در صورت ریزدانه بودن خاک زیر ساختمان تاثیر قابل ملاحظه ای بر سازه ساختمان نداریم. در راستای یافتن راهکاری برای کاهش اثر ارتعاشات بر ساختمانهای مجاور ریل، تکنولوژی میراگر که موجب کاهش اثرات ارتعاشات می‌گردد، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل بیانگر کاهش اثر ارتعاشات قطار بر ساختمانهای مجاور ریل در صورت استفاده از میراگرها می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** نوسانات قطار، تماس چرخ و ریل، تحلیل فرکانسی، ایمنی سازه، حداکثر سرعت ذره.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۳/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۷/۱۵

<sup>i</sup> نویسنده مسئول، دانشجو ارشد، دانشگاه علم صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه آهن، araghaiefar@rail.iust.ac.ir  
<sup>ii</sup> استاد یار، دانشگاه علم صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه آهن، rezvani@mail.iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

به این دلیل که سازه‌ها مکرراً در بالا یا دور یا مجاورت خطوط راه آهن ساخته شده‌اند، بنابراین مشکلات انتقال ارتعاشات و سر و صدا از طریق سازه به ساختمانهای مجاور ناشی از راه آهن، نیاز به بررسی دقیق دارد [۲]. نوسانات حاصل از قطار به دو صورت ارتعاش و صدا منتشر می‌شود که می‌تواند از طریق هوا یا از طریق خاک بر ساختمان های مجاور ریل اثرگذار باشد. در این جا

با توجه به روند رو به رشد جمعیت جهانی، جمعیت شهری نیز رو به افزایش است. در گذشته، در شهرها فرض بر این بوده است که برای ساختمان سازی همه زمینها می‌تواند مناسب باشد. در حال حاضر باید در این رابطه مجدداً اطمینان حاصل شود.

## ۲- مفاهیم و اصطلاحات

حداکثر سرعت ذره یا حداکثر شتاب ذره: مبنای سنجش ارتعاشات حاصل از قطار که قابل اندازه‌گیری می‌باشد، سرعت یا شتاب ذره می‌باشد که به واحد متر بر ثانیه یا متر بر مجذور ثانیه و یا دسی‌بل بیان می‌شود.

دسی‌بل: کمیت دسی‌بل مطابق با رابطه زیر تعریف می‌گردد. که در آن  $X_0$  کمیت مرجع می‌باشد که بسته به نوع کشور و استاندارد مورد نظر، سرعت یا شتاب ذره انتخاب می‌گردد. در آمریکا مقدار مرجع  $10e-6$  متر بر ثانیه به عنوان مقدار مرجع برای سرعت ذره در نظر گرفته می‌شود و در کشورهای اروپایی مقدار مرجع برای سرعت مرجع دارای مقادیر متفاوتی از جمله  $10e-9$ ،  $0.5*10e-8$ ،  $10e-8$  متر بر ثانیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در استاندارد سوئد (SS 460 (1992)) 61 48 مقادیر  $10e-9$  متر بر ثانیه و  $10e-6$  متر بر مجذور ثانیه به ترتیب برای سرعت و شتاب مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱]

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{X}{X_0}\right) \quad (1)$$

لازم به ذکر است در این تحقیق مقادیر  $10e-9$  متر بر ثانیه و  $10e-6$  متر بر مجذور ثانیه به ترتیب برای سرعت و شتاب مرجع مورد استفاده قرار گرفته است.

اثر ارتعاشات بر ساختمانهای مجاور خطوط آهن کشورهای اسکاندیناوی از جمله کشورهای پیشرو در امر ارزیابی ارتعاشی ناشی از انواع سیستم‌های حمل و نقل از جمله قطار شهری می‌باشند. سوئد نیز از جمله کشورهای است که به مقوله ارزیابی ارتعاشی سیستم‌های حمل و نقل ریلی بسیار پرداخته است. مرکز تحقیقات حمل و نقل سوئد در رابطه با بررسی ارتعاشی سیستم حمل و نقل ریلی مطلب زیر را ارائه داده است:

تجربیات بدست آمده از اندازه‌گیریهای متعدد نشان می‌دهند که در شرایط بسیار نادر ارتعاشات ناشی از حرکت قطار در فاصله ۱۵ متری از محور خط از ۴ تا حتی ۲ میلی متر بر ثانیه بیشتر می‌شوند. بنابراین امکان ایجاد آسیب ارتعاشی ناشی از عبور قطار به ساختمان‌های مجاور خط بسیار پایین می‌باشد و در برخی موارد که ساختمان بسیار نزدیک به خط ریلی باشد، و شرایط ارتعاشی خط نیز بسیار بحرانی فرض گردد، آسیب به نازک‌کاری ساختمان مشاهده گردیده است. معمولاً حد

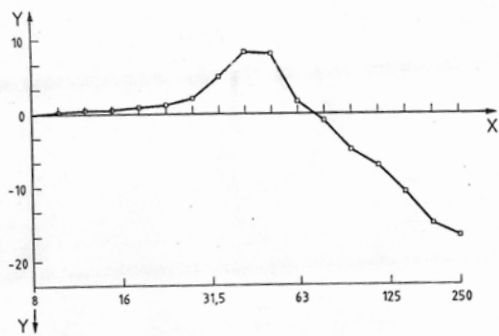
موضوع بحث ارتعاشاتی می‌باشد که از طریق زمین بر ساختمان‌های مجاور ریل تأثیرگذارند و بحث صدا مطرح نیست.

این ارتعاشات ممکن است ناشی از نامیزانی در حرکت قطار و یا ناشی از ناصافی سطح تماس چرخ و ریل باشند. ارتعاشات حاصل از قطار و منتقل شده از طریق خاک که بر ساختمان‌های مجاور ریل اثر می‌گذارد، می‌تواند بر سازه ساختمان اثرگذار باشد و یا می‌تواند از طریق ارتعاش اجزا ساختمان و تولید صدا اثرگذار باشد و در نهایت ممکن است بر بهره برداران از سازه‌های مجاور ریل تأثیر بگذارد که در اینجا بحث تأثیرات بر سازه ساختمان‌های مجاور ریل مطرح است.

باتوجه به مباحث ایمنی سازه ساختمان‌های مجاور ریل، پر واضح است که موضوع فوق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دستاورد علمی این پژوهش، مدل سازی ارتعاشات و همچنین مدلسازی ساختمان و مقایسه ریزدانه و درشت دانه بودن خاک زیر ساختمان و اعمال ارتعاش به ساختمان از طریق مدل مجازی در فضای نرم افزار می‌باشد. روش تحقیق نرم افزاری می‌باشد که ارتعاشات قطار به صورت نیرویی برحسب زمان به مدل نرم افزاری سیستم ریلی وارد شده و بعد از انتقال به خاک به ساختمان مجاور ریل وارد می‌شود. براساس مراجع معرفی شده، محدوده آسیب به ساختمان مجاور ریل و محدوده خرابی ساختمان، باتوجه به خروجی نرم افزار قابل بررسی است. در این تحقیق به استاندارد ISO 14837 توجه ویژه‌ای شده است.

برای مدل سازی، نرم افزارهای مختلف مورد بررسی قرارگرفت اما در نهایت از نرم افزار انسیس (ورژن ۱۰) استفاده شده است که قابلیت بررسی موضوع را دارد.

محاسبات نرم افزاری و بررسی‌ها در این تحقیق ابتدا در رابطه با تاثیر ارتعاشات تحت بارهای آنی بر ساختمان میباشد و سپس تحت بارگذاری مدت دار می‌باشد. با توجه به دخیل بودن عوامل متعدد واقعی مثل تاثیرات ضربه ناشی از ترمز گیری و استفاده از بیش از ظرفیت و توان قطار و غیره، نتایجی که احتمال آسیب به ساختمان را مطرح خواهند کرد، حداقل آسیب میباشد یا به عبارت دیگر در این تحقیق هر جا احتمال آسیب به ساختمان مشخص شود، حتی تخریب‌های بیشتر از آنچه مطرح شده است، امکان بروز دارد.



شکل ۱: مثالی از تغییرات ارتعاشات در نقطه تماس چرخ و ریل که از استاندارد ISO 14837-1 اقتباس شده است. محور قائم بر حسب دسی بل و سرعت ذره ناشی از ارتعاش می باشد. محور افقی بر حسب فرکانس می باشد

جهت ارتباط نمودار شکل ۱ با حداکثر سرعت ذره، به تعریف دسی بل در بخش قبل مراجعه شود.

لذا نقطه حداکثر منحنی شکل ۱ معادل حداکثر سرعت ذره می باشد. در این تحقیق منحنی شکل فوق از استاندارد به عنوان منحنی خام جهت انجام محاسبات نرم افزاری مبنای عمل قرار گرفته است. که در رابطه با منحنی لازم به ذکر است باتوجه به شواهد موجود در متن استاندارد و مقادیر واقعی حداکثر سرعت ذره در سطح تماس چرخ و ریل، بنا به توضیح شکل در متن استاندارد "مثالی از تغییرات (افزایش) ایجاد شده الگو در نقطه تماس چرخ و ریل و پیش بینی شده در مدل قطار و خط" و همچنین توضیحات محور قائم در متن استاندارد "دسی بل: تغییر (افزایش) ایجاد شده در تماس چرخ و ریل وابسته به خط تعریف شده مبنا"، بر اساس تعدد نقاط تماس چرخ و ریل لذا منحنی باید در راستای محور قائم انتقال یابد یا به عبارت دیگر سرعت ذره با نسبتی بزرگتر از عدد یک افزایش یابد، تا به منحنی مد نظر برای سرعت های معمولی قطار تبدیل شود.

در این استاندارد به بحث های ارزیابی خرابی ساختمان های مجاور ریل و ریسک خرابی ساختمان های مجاور ریل تحت تأثیر ارتعاشات قطار منتقل شده از خاک، مستقیماً اشاره شده است که نشان دهنده اهمیت موضوع از لحاظ ایمنی می باشد. در بخش هایی از این استاندارد آمده است:

«نوعاً فرکانس های مهم از ۱۰۰ هرتز کمتر می باشد، زیرا آنها پاسخ ساختمان را مشخص می کند» و همچنین «محدوده مناسب فرکانس برای ارزیابی ریسک ارتعاشات وارد شده و تأثیرگذاری در خرابی سازه ها و ساختمان ها

بزرگی آستانه ارتعاشات زمینی جهت ایجاد آسیب به نازک کاری ساختمانها حداقل ۳ برابر بیشتر از بزرگی ارتعاش ناشی از ترافیک ریلی در فاصله ۱۵ متری از خط می باشد و بنابراین آسیب سازه ای در فاصله بیش از ۱۵ متر از محور خط برای قطارهای شهری و حتی قطارهای سریع السیر مصداق ندارد [۱].

در رابطه با موضوع مورد بحث بعضی از استانداردهای بین المللی و ملی مطالبی را ارائه می دهند که به عنوان نمونه استاندارد ISO 14837-1 «تحت عنوان عمومی نوسانات مکانیکی ناشی از سیستم ریلی که از طریق خاک عبور می کند و شامل صدا و ارتعاش می باشد» مطرح است. در این استاندارد به طور کلی مبانی و نظرات عمده-ای راجع به موضوع فوق بیان شده است و مخصوصاً در عناوینی در متن استاندارد به طور کامل به بحث اثر ارتعاشات بر سازه ساختمان های مجاور ریل پرداخته است [۶].

در این استاندارد مبنای بررسی اثر ارتعاشات برای ارزیابی خرابی ساختمان ها، حداکثر سرعت ذره می باشد که با واحد دسی بل مد نظر قرار گرفته است. قطاری که از روی ریل عبور می کند از دو طریق می تواند به خاک زیر ریل ارتعاش وارد کند:

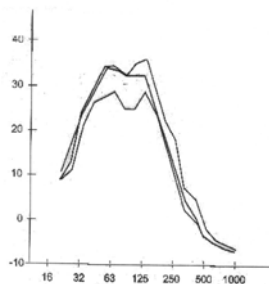
- در حرکت قطار و تجهیزات متحرک قطار در حین عبور می تواند نامیزانی به نسبت آن چه قطار در حالت نو و سالم و مناسب کار می کند، ایجاد شود که باعث به وجود آمدن ارتعاشاتی می شود و موضوع مورد بررسی در این تحقیق اثراتی از این ارتعاشات است که به سطح تماس چرخ و ریل می رسد.

- با توجه به طول عمر سیستم ریلی و یا قطار، وجود ناصافی در سطح ریل و پخی در چرخ غیرقابل اجتناب است که قسمت عمده ارتعاشات تأثیرگذار بر زمین از این گونه ارتعاشات می باشد.

ارتعاشاتی که تولید می شود دارای سرعت های ذره مختلفی می باشند و آن چه مبنای عمل است، حداکثر سرعت ذره می باشد.

استاندارد ISO 14837-1 در بحث اثر ارتعاشات، منحنی بخش e از شکل ۲ را ارائه داده است که تغییرات ایجاد شده، الگو در تماس چرخ و ریل می باشد. این نمودار در شکل ۱ آمده است. محور قائم نمودار دسی بل و محور افقی نمودار فرکانس می باشد.

همانطور که از شکل زیر نیز برآورد می‌گردد، فرکانس‌های اندازه‌گیری شده در محدوده ۳۰ الی ۲۵۰ هرتز هستند. طوقه‌های چرخ سایش یافته در سرویس تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بزرگی ارتعاش نسبت به چرخهای با پروفیل اصلاح شده و نو دارند. پخ شدگی چرخ نیز افزایش بیشتر ارتعاش در فرکانس‌های بیش از ۶۰ هرتز بوجود می‌آورد. ارتعاشات بوجود آمده ناشی از ضربات پخ‌شدگی‌های چرخ با فرکانس بالاتری به ساختمان‌های مجاور منتقل می‌گردد و اثر اکوستیک دارد.



شکل ۲: ارتعاش اندازه‌گیری شده در یک ساختمان نزدیک به یک راه آهن زیر زمینی، محور قائم: شتاب زره (دسی بل) در حالتیکه مقدار مرجع  $10^{-4}$  می‌باشد، محور افقی: فرکانس (هرتز)، منحنی فوقانی: در حالتیکه چرخها فرسوده باشند و بر اثر لغزش، خرابیهایی همچون پخی در چرخ وجود دارد، منحنی میانی: چرخ های فرسوده بدون پخی، منحنی تحتانی: چرخ های اصلاح شده یا نو و بدون پخی

افزایش ارتعاش در اثر ناهمواریهای ریل نیز مثلاً وجود درز ریل یا خرابیهایی ناشی از غلتک زنی ریل، متصور می‌باشد. به علت موج کوتاه خرابیها و ناهمواریهای ریل آنها سهم زیادی در ارتعاشات با فرکانس پایین ندارند. با توجه به منحنی فوق حداکثر شتاب زره تاثیر گذار بر خرابی ساختمان در محدوده ۱ تا ۱۰۰ هرتز برای حالت سیستم ریلی فرسوده حدود ۲۰ درصد بیش از سیستم ریلی نو میباشد. اما بر اساس مقدار مرجع شتاب در این تحقیق و بر مبنای محاسبات از شکل منحنی ۲، نتیجه میشود که حداکثر شتاب زره و به طور مشابه حداکثر سرعت زره تاثیر گذار بر خرابی ساختمان در محدوده ۱ تا ۱۰۰ هرتز برای حالت سیستم ریلی فرسوده حدود ۱۰ درصد بیش از سیستم ریلی نو میباشد. بنابراین حداکثر سرعت زره (بر مبنای واحد دسی بل) هم در این محدوده جهت مقایسه نسبت سیستم ریلی فرسوده به نو حدود از ۱,۱ میباشد.

از ۱ هرتز تا ۵۰۰ هرتز می باشد، هرچند در موارد بسیاری ریسک بیشتر خرابی با فرکانس های پایین ارتباط دارد» و همچنین «بیشتر ساختمان ها تحت تأثیر فرکانس در محدوده ۱ تا ۱۵۰ هرتز در معرض خرابی قرار می گیرند» لذا در این تحقیق جهت بررسی خرابی ساختمان- های مجاور ریل محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰۰ هرتز مبنای عمل قرار گرفته است به طوری که حداکثر سرعت زره مورد بررسی در ساختمان در این محدوده مبنای نتایج تحقیق می باشد.

### ۳- حد آسیب به ساختمان

اگر حداکثر سرعت زره در ساختمان به ۲ میلی متر بر ثانیه برسد، نازک کاری ساختمان آسیب می‌بیند یا به عبارت دیگر در نازک کاری ترک ایجاد میشود یا ترکهای قدیمی دوباره باز میشوند و اگر ساختمان قدیمی و تاریخی باشد در این حد، دچار خرابی میشود. همچنین اگر حداکثر سرعت زره به ۵۰ میلی متر بر ثانیه برسد خرابی سازه ای جدی در ساختمانها ایجاد می‌شود [۷].

### ۴- مواردی از آزمایش انجام شده و ارائه شده

#### در مقالات آکادمیک

در این رابطه آزمایشات فراوانی در سطح دنیا انجام شده است به گونه‌ای که شتاب زره و یا سرعت زره در فواصل مختلف از ریل و در ساختمان‌های مجاور ریل اندازه گیری شده است :

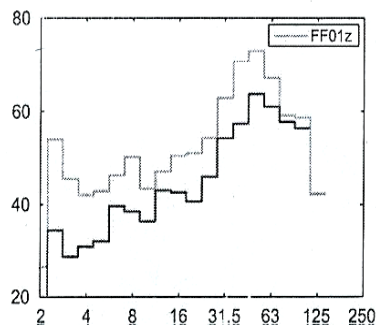
#### ۴-۱- مقایسه سیستم ریلی فرسوده ونو

چندین آزمایش ارتعاشی توسط کمیته ORE D 151 انجام پذیرفته است که در این قسمت به یکی از آنها اشاره می‌گردد [۱].

شکل زیر طیف شتاب اندازه‌گیری شده در طبقه اول یک ساختمان در حین عبور قطار به سرعت ۶۰ کیلومتر در ساعت را نمایش می‌دهد. در آزمایش سه وضعیت چرخ مورد بررسی قرار گرفت. چرخهایی با پروفیل اصلاحی نو و جدید، چرخهایی که حدود ۱۵۰۰۰۰ کیلومتر در سرویس بوده‌اند، و چرخهای فرسایش یافته با بهره‌برداری بیش از ۱۵۰۰۰۰ کیلومتر که در آنها پخی چرخ ناشی از لغزش چرخهای قطار مثلاً به علت ترمزگیری اضطراری شکل گرفته بود.

## ۴-۲- مقایسه نتایج محاسبات عددی با آزمایش

بر اساس مقایسه نتیجه محاسبات تعیین حداکثر سرعت زره ارتعاشات زمینی حاصل از قطار به روش اجزا محدود با اندازه گیریها در فاصله معینی از خط (اندازه گیری شده در لندن) منحنی زیر ارائه شده است [۸]



شکل ۳: مقایسه نتایج محاسبات (منحنی سیاه رنگ) با آزمایش (منحنی خاکستری رنگ) که محور قائم کمیت مجذور میانگین مربعات (rms) مربوط به سرعت زره با واحد دسی بل (با مقدار مرجع  $10e-8$ ) و محور افقی فرکانس میباشد

بر اساس مقایسه نتایج محاسبات با آزمایش که در شکل ۳ ارائه شده است، حداکثر سرعت زره جهت مقایسه نسبت نتایج آزمایش به نتایج محاسبات عددی در محدوده مورد آزمایش تقریباً  $1/15$  میباشد، اما بر اساس مقدار مرجع سرعت زره در این تحقیق و بر مبنای محاسبات از شکل منحنی ۲، نتیجه میشود که ضریب افزایش از نتایج محاسبات عددی به واقعیت بر مبنای واحد دسی بل برابر  $1/11$  میباشد.

## ۵- بارگذاری آبی (بر مبنای مدل‌های نرم افزاری)

### ۵-۱- کلیات مدل‌های مورد بررسی

در این تحقیق در رابطه با دو مورد، مدل سازی انجام شده است.

مورد اول که به عنوان مطالعه موردی محسوب می شود، ساختمان هفت طبقه بتنی تالار شهر مشهد با کاربری فرهنگی و اداری می باشد که باتوجه به مطالعات انجام شده در مجاورت و در بالای نزدیک ترین ایستگاه قطار سبک شهری به حرم مطهر امام رضا (ع) در میدان شهدا در مشهد تکمیل خواهد شد. ایستگاه قطار شهری مدنظر، به نام ایستگاه G2 نام گذاری شده است که هنوز

به بهره برداری نرسیده است.

در مطالعه موردی، سرعت قطار سبک شهری  $80$  کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد و فرض شده که دو قطار در دو جهت مقابل همزمان از ایستگاه عبور کنند، یا به عبارت دیگر بد بینانه ترین حالتی که در شرایطی همچون عبور قطار از ایستگاه با توجه به عدم ظرفیت خالی در واگنها، امکان عبور دو قطار در ایستگاه با حد اکثر سرعت و در دو جهت مقابل میباشد فرض شده است. مورد دوم ساختمان ایستگاه بین راهی فرضی که از هر طرف آن یک خط ریلی عبور می کند (ایستگاه جزیره ای) در نظر گرفته شد. قطار مورد نظر سریع السیر با بیشترین سرعت آزمایش شده در جهان در خطوط عادی تا سال  $2007$  فرض شده است که این سرعت  $574.8$  کیلومتر بر ساعت میباشد [۲].

هدف از مدل سازی ارزیابی اثر ارتعاشات قطار بر سازه ساختمان تالار شهر مشهد و ساختمان ایستگاه بین راهی فرضی می باشد.

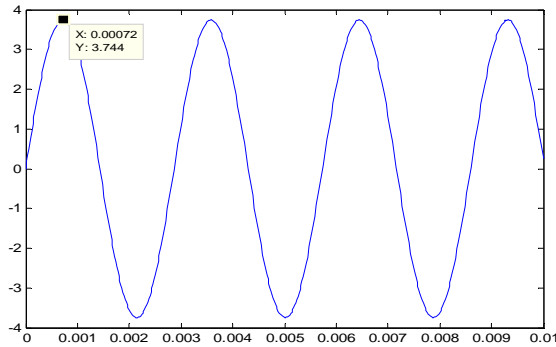
در مدل سوم و نهایی ارتعاشات اثرگذار به ایستگاه بین راهی فرضی با تکنولوژی میراگر کاهش می یابد.

### ۵-۲- ورودی نرم افزار

ورودی نرم افزار قاعده‌تاً باید ارتعاشات حاصل از قطار باشد. همان طور که در فصل قبل آمد، جهت ورودی نرم افزار از منحنی شکل 2-e از استاندارد ISO 14837 - 1 به عنوان منحنی خام استفاده شده است. این منحنی مثالی از تغییرات سرعت زره ارتعاش برحسب دسی بل را در مقابل فرکانس ترسیم کرده است که ارتعاشات در نقطه تماس چرخ و ریل ارائه شده اند. همانطور که در قبل توضیح داده شد باتوجه به متن استاندارد که مثالی از تغییرات ارتعاشات قطار را به شکل ۱ مطرح می کند و همچنین بر اساس تعدد نقاط تماس چرخ و ریل، اعداد محور قائم باید در ضریبی مناسب ضرب شود تا با افزایش ارتعاشات به ورودی نرم افزار برسیم.

آن چه در اثر ارتعاش قطار بر ساختمان مجاور ریل مبنای عمل می باشد، حداکثر سرعت زره می باشد لذا برای تعیین منحنی واقعی ارتعاش در سطح تماس چرخ و ریل، به اندازه واقعی حداکثر سرعت زره برای سرعت های قطار در دو نوع مدل نیاز داریم. باتوجه به تحقیقات انجام شده و ارائه شده در مقالات، شکل ۴ که طبق آزمایشات انجام گرفته در لندن حداکثر سرعت زره را برحسب

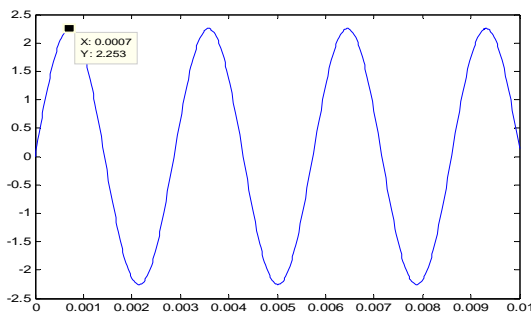
سرعت قطار در محل تماس چرخ و ریل ارائه می دهد  
مبنای محاسبات قرارگرفت [۹].



شکل ۶: شتاب برحسب زمان ناشی از ارتعاش در نقطه تماس چرخ و

ریل برای قطار سبک، محورافقی: زمان برحسب

ثانیه، محور قائم: شتاب برحسب متر بر ثانیه



شکل ۷: شتاب برحسب زمان ناشی از ارتعاش در نقطه تماس چرخ و

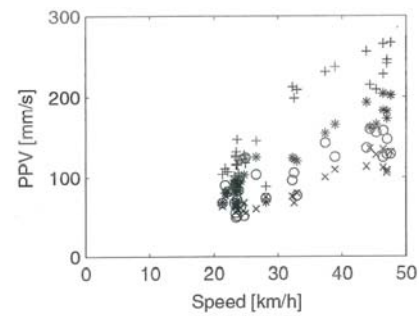
ریل برای قطار سریع، محورافقی: زمان بر حسب ثانیه، محور

قائم: شتاب بر حسب متر بر ثانیه

وزن قطار در قطار سبک شهری مشهود ۲۵۰ تن و وزن قطار سریع السیر ۷۸۰ تن در نظر گرفته شد که باتوجه به فرمول زیر از روی منحنی شتاب برحسب زمان، منحنی نیرو بر حسب زمان به دست می آید که به صورت سینوسی فرض می شود.

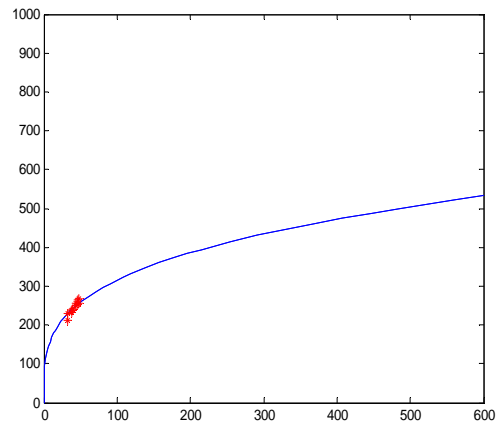
$$F = ma \quad (2)$$

در نرم افزار انسیس جهت بارهای سینوسی می توان از آنالیز هارمونیک استفاده شود و ورودی نرم افزار فرکانس و حداکثر مقدار بار می باشد که باتوجه به نیروی حاصله به صورت سینوسی برحسب زمان در این جا فرکانس برابر ۳۴۹ هرتز و حداکثر نیرو به ترتیب برای یک قطار سبک شهری و یک قطار سریع السیر برابر ۵۶۳۲۵۰ و ۲۹۲۰۳۲۰ نیوتن می باشند. این نیرو به طور یکنواخت در گره هایی که در مدل برای ریل ها تعریف شده است وارد شد.



شکل ۴: سرعت ذره ناشی از ارتعاش قطار برحسب سرعت قطار در نقطه تماس چرخ و ریل براساس آزمایشات در لندن

نقاط حداکثر شکل ۴ باتوجه به مبنای ریاضی به صورت منحنی تعریف شد که منحنی شکل ۵ حاصل شد. طبق منحنی جدید حداکثر سرعت ذره برای سرعت قطار معادل ۸۰ کیلومتر بر ساعت در نقطه تماس چرخ و ریل برابر ۲۹۶،۲۳۴ میلی متر بر ثانیه و همچنین حداکثر سرعت ذره برای سرعت قطار معادل ۵۷۴،۸ کیلومتر بر ساعت در نقطه تماس چرخ و ریل برابر ۵۱۸،۶۵۱ میلی متر بر ثانیه تعیین شد



شکل ۵: ادامه منحنی شکل ۴ براساس تعریف ریاضی منحنی

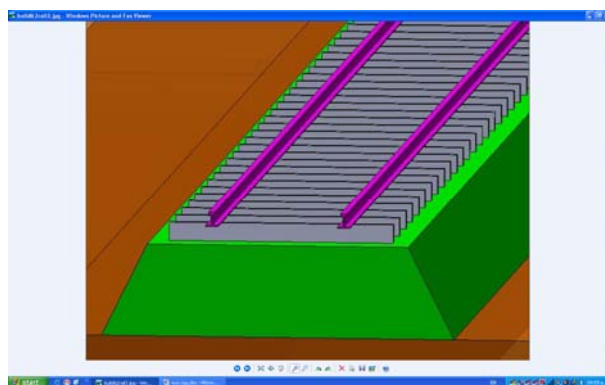
$$y = 40.5793x^{(1/6)} + 49.2009x^{(1/3)}$$

باتوجه به توضیحات فوق منحنی خام موجود در استاندارد با تبدیل لگاریتمی برای سرعت های ۸۰ و ۵۷۴،۸ کیلومتر بر ساعت به منحنی سرعت ذره (متر بر ثانیه) برحسب فرکانس تبدیل شد.

با تبدیل "فوریه معکوس" از منحنی سرعت ذره بر حسب فرکانس، منحنی سرعت برحسب زمان حاصل شد. سپس از منحنی سرعت برحسب زمان، دیفرانسیل گرفته شد که منحنی شتاب برحسب زمان که حالت سینوسی دارد حاصل شد که در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

### ۵-۳- مدل سیستم ریلی

در راستای مدل سازی سیستم ریلی به ترتیب ریلها و تراورس ها و بالاست مدل شده اند و نیروی حاصل از قطار در سطح تماس چرخ و ریل به تاج ریلها وارد شد. ریل مربوط به قطار سبک شهری مشهد از نوع UIC54 می باشد که با جزئیات کامل در نرم افزار مدل شد. ریل مربوط به قطار سریع السیر نیز از نوع چرخ و محور از نوع UIC60 با جزئیات کامل مدل شد. تراورس ها از جنس بتن با مشخصات کامل همانطور که در شکل های مربوط به مدل سازی ایستگاه بین راهی فرضی مشخص است مدل شده اند. و بالاست برای قطار سریع السیر؛ حالت هندسی نوزنقه ای از جنس خاک با مشخصات بالاست مدل شدند. در جهت قائم جابجایی اعمالی ناشی از ارتعاش قطار در سطح ریل بسته شده است یا به عبارت دیگر ریلها در جهت قائم حرکتی ندارند.



شکل ۸) مدل سیستم ریلی

### ۵-۴- مدل سیستم ژئوتکنیک

خاک زیر ساختمان و زیر ریل و همچنین بالاست در نرم افزار Ansys با مشخصات ژئوتکنیک به شرح زیر مدل شد.

#### الف- بالاست

بالاتست با مشخصات ژئوتکنیکی شامل ضریب چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک داخلی ۴۰ درجه و ضریب پواسون ۰/۱ و مدول الاستیسیته ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مدل شد

#### ب- مطالعه موردی

خاک رسی طبق آزمایشات محلی با چسبندگی ۰/۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، زاویه اصطکاک داخلی ۱۷ درجه و ضریب پواسون ۰/۳۳ و مدول الاستیسیته ۸۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مدل شد.

#### ج- ایستگاه بین راهی فرضی

خاکهای ریز دانه و درشت دانه در نظر گرفته شد، خاک ریز دانه مشابه آنچه در مبحث قبل قسمت مطالعه موردی آمد می باشد و خاک درشت دانه با چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و ضریب پواسون ۰/۳۳ و مدول الاستیسیته ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (عموما مدول الاستیسیته خاکهای درشت دانه بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد) مدل شد [۱۰].

#### ج- عمق نفوذ

عمق نفوذ ارتعاشات مرزهای محدوده وسیعی از خاک می باشد که در حول و حوش ایستگاه و ساختمان نرم افزار مدل شده است و در لبه های انتهایی حجم وسیع خاک در خطوط مرزی انتهایی جابجایی به صفر می رسد.

### ۵-۵- کلیات مدل سازه

ساختمانهای مدل شده بصورت کامل با مشخصات بتن مسلح مدل شده اند، در رابطه با مطالعه موردی ساختمان هفت طبقه و همچنین ایستگاه قطار سبک شهری مشهد بر اساس نقشه های ارائه شده از شهرداری مشهد، مدل شد و در رابطه با ایستگاه بین راهی فرضی بر اساس محاسبات عمرانی ساختمان بتنی یک طبقه با ابعاد ۳ × ۲ متر مربع مدل شد.

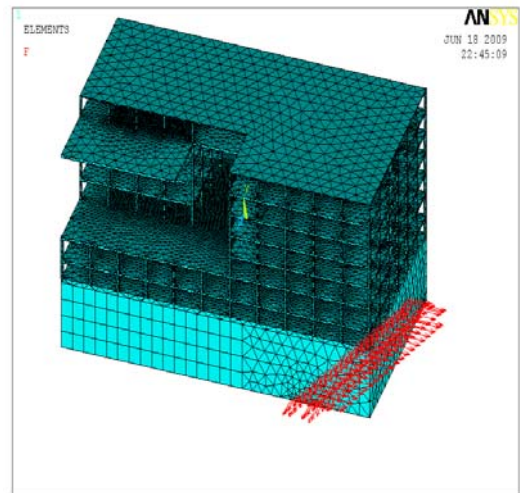
### ۵-۶- خروجی نرم افزار مدل مطالعه موردی

با توجه به عملیات محاسباتی بر روی حداکثر جابجایی ساختمان در خروجی نرم افزار، و اعمال ضرایب افزایش جهت تبدیل محاسبات به واقعیت و همچنین جهت تبدیل به سیستم ریلی فرسوده، حداکثر سرعت ذره در ساختمان به مقدار ۰,۷۸ میلیمتر بر ثانیه می رسد.

باشد به ۱,۶۴ و ۱۹,۹ میلیمتر بر ثانیه میرسد.

### ۵-۸- بامدل کردن دمپر

با مدل کردن دمپر در زیر ساختمان با خصوصیات و مشخصات لایه های دمپر که از شرکت ساختمانی "BSW" (در آلمان مشغول فعالیت می باشد) اخذ شد، در صورتیکه خاک زیر ساختمان درشت دانه باشد(تنها موردی که آسیب سازه ای داریم) حداکثر سرعت زره از ۱۹,۹ به مقدار ۱,۷۲ میلیمتر بر ثانیه میرسد.



### ۶- بارگذاری مدت دار

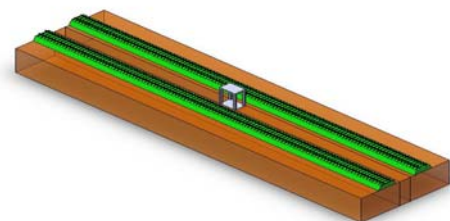
بارگذاری مدت دار برای ایستگاه بین راهی فرضی در بحرانی ترین یا به عبارت دیگر حالت خاک درشت دانه و بدون میراگر برای قطار سریع السیر مورد بررسی قرار گرفت به این نحو که بر اساس محاسبات نرم افزاری در سطح فونداسیون ساختمان مقدار تنش حاصل از بار مرده(کل وزن ساختمان تقسیم بر سطح فونداسیون)  $27407.5$  نیوتن بر متر مربع می باشد و بر اساس میحث ششم از مقررات ملی ساختمان مقدار بار زنده برابر  $2500$  نیوتن بر متر مربع می باشد که با ضریب  $20\%$  اعمال خواهد شد (با توجه به حالت بار که هارمونیک می باشد با زلزله مشابه سازی شده است) [۳].

بر اساس آئین نامه بتن ACI در مواردی که بحث بارهای مدت دار یا خستگی مطرح است مقدار  $f_c$  با ضریب  $0.6$  به عنوان تنش مجاز در نظر گرفته می شود [۱۱-۱۲].

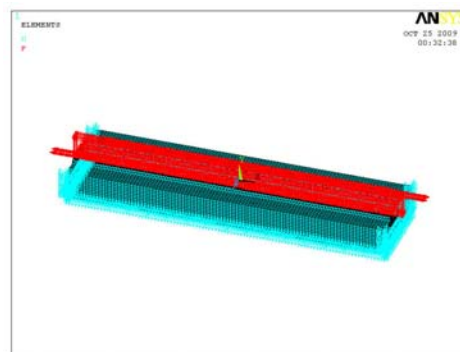
بر اساس خروجی نرم افزار با توجه به بررسی نتایج تنش در ساختمان که نقطه تنش حداکثر در سطح فونداسیون مورد توجه قرار گرفت، میزان حداکثر تنشهای حاصل از ارتعاشات قطار در سطح فونداسیون برابر  $0.174e7$  نیوتن بر متر مربع می باشد.

بنابراین حداکثر تنش بر سطح فونداسیون ساختمان برابر با مجموع تنشهای بار مرده و  $20\%$  از بار زنده و تنش حاصل از ارتعاشات قطار می باشد که کمتر از تنش مجاز در حالت بارگذاری مدت دار است (تنش مجاز بر اساس محاسبات طراحی سازه بتنی  $= 7344000$  نیوتن بر متر مربع) [۱۱].

شکل ۹) نیروی ورودی نرم افزار و جهت نیرو در سطح ریل با توجه به اعمال نیرو در نقاط متعدد تعریف شده در سطح ریل) با بردارهای متعددی مشخص است همچنین مش بندی ساختمان مشخص است



شکل ۱۰) مدل ایستگاه بین راهی



شکل ۱۱) اعمال نیروی دو قطار بر ریلهای مجاور ساختمان ایستگاه بین راهی

### ۵-۷- مدل ایستگاه بین راهی بدون استفاده از دمپر

با فرضیات مشابه مدل مطالعه موردی حداکثر سرعت زره در ساختمان به ترتیب در حالتی که خاک زیر ساختمان ریزدانه و درشت دانه (با خصوصیات ژئوتکنیک متوسط)



$2740.5 + 2500 \times 0.2 + 0.147e + 7 < 7344000 \frac{N}{m^2}$   
لذا بر اثر بارهای مدت دار سازه ساختمان مجاور ریل مدل شده دچار خرابی کامل سازه ای (collapse) نمی شود.

## ۷- نتیجه گیری

### ۷-۱- تحلیل فرکانسی

با توجه به ISO14837-1 حداکثر سرعت ذره در محدوده فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ هرتز مبنای خرابی ساختمانهای مجاور ریل میباشد. بر اساس مشابهنه منحنی ورودی به نرم افزار با منحنی خروجی، حداکثر سرعت های ذره حاصل از خروجی نرم افزار در محدوده خرابی ساختمان مد نظر قرار گرفته اند.

بر اساس مطالب عنوان شده در قبل حد آسیب به نازک کاری ساختمان برای حداکثر سرعت ذره برابر ۲ میلی متر بر ثانیه میباشد و حد آسیب جدی سازه ای برابر ۵۰ میلی متر بر ثانیه است که در این حد سازه ساختمانهای قدیمی و تاریخی دچار خرابی میشوند. با توجه به نتیجه تحقیق که حداکثر سرعت ذره در بد بینانه ترین حالت تردد قطارهای عبوری منتقل شده به ساختمان هفت طبقه حتی کمتر از حد آسیب به نازک کاری است، نتایج نشان می دهد که ارتعاشات بر ساختمان هفت طبقه که فونداسیون آن کمی بیش از ۱۵ متر از ریل فاصله دارد تحت بارگذاری لحظه ای حاصل از ارتعاشات عبور قطارها تأثیر قابل ملاحظه ای ندارد، در رابطه با ایستگاه بین راهی فرضی بر اساس مقدار حداکثر سرعت ذره در حالتیکه خاک زیر ساختمان ریزدانه باشد خطری وجود ندارد اما اگر خاک زیر ساختمان درشت دانه باشد با شرایط مدل انجام شده آسیب های سازه ای داریم اما آسیب جدی سازه ای نداری به طوریکه ساختمان فرو نمیریزد. آنچه با شرایط مدل در حالت اخیر قطعی است آسیب به نازک کاری و خرابی ساختمانهای قدیمی و تاریخی است. در آسیب به نازک کاری ترکهایی ایجاد میشود یا ترکهای قدیمی دوباره باز میشوند، که با استفاده از لایه دمپر در زیر ساختمان خطرات فوق رفع میشود.

با توجه به مطالب قبلی، مرکز تحقیقات حمل و نقل سوئد نیز در رابطه با بررسی ارتعاشی سیستم حمل و نقل ریلی

نتایج مشابهی را ارائه منتشر کرده است.

### ۷-۲- جمع بندی

احداث خطوط ریلی در مجاورت ساختمان ها یا احداث ساختمان ها در مجاورت خطوط ریلی و همچنین تغییرات در سیستم های ریلی با توجه به جهت گیری کشور ایران به سمت استفاده از قطارهای سریع السیر بیم آزدگی ناشی از انتقال ارتعاش از طریق خاک به سازه های مجاور ریل را افزایش می دهد.

با توجه به نتایج حاصل از سرعت قطار سریع السیر فرضی و شرایط مدل ایستگاه بین راهی، در شرایط عادی و معمول سیستم ریلی از نظر فنی، فعلاً تا مدتی در رابطه با ایستگاه های بین راهی که خاک زیر آنها ریزدانه باشد، برای ایستگاه های بین راهی ایران خطری از لحاظ سازه ای وجود نخواهد داشت، اما بر اساس مدل نرم افزاری مشابه، در صورتی که خاک زیر ساختمان ایستگاه بین راهی درشت دانه باشد خطر آسیب به نازک کاری ساختمان (به طوریکه اندود نازک کاری ترک میخورد و یا ترکهای قدیمی دوباره باز میشوند) وجود دارد و اگر ساختمان قدیمی و تاریخی باشد ممکن است دچار خرابی شود. همچنین تصمیم گیری برای ورود آخرین تکنولوژی آزمایشی در خطوط عادی حتی خرابی سازه ای ایستگاههای بین راهی، محتمل است. در همه موارد در صورت احتمال آسیب میتوانیم با مدل کردن دمپر خطر را حذف کنیم.

در خاتمه مجدداً لازم به ذکر است با توجه به اینکه در مدل های نرم افزاری شرایط واقعی به طور کامل لحاظ نشده است، لذا احتمال آسیب های بیشتری برای سازه های مدل شده وجود دارد.

## ۸- مراجع

- [۱] یلداشخان، ماهان، " ارزیابی و تحلیل ارتعاشات ناشی از قطار و راهکارهای کاهش ارتعاش "، سمینار کارشناسی ارشد عمرن راه و ترابری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی،
- [۲] افتخاری، سید مجید و ناصری، داود، " از مطالب ارائه شده در پشت جلد نشریه فنی و تخصصی پیام رجا "، شرکت قطارهای مسافربری رجا، سال هشتم، شماره ۲۳، شهریور ۱۳۸۶
- [۳] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، معاونت

- Prof. Tore Dahlberg, "The Influence of under sleeper pads on Railway Track Dynamics", Department and Engineering Division of soil Mechanics, 2008.
- Degrade, G., and Schevenels, M., and Chatterjee, P., "vibration due to a test train at variable in a deep bored tunnel embedded in London clay", journal of sound vibration, Vol 293, pp 626-644, 2006
- ACI committee 318 structure building code "Building Code Requirements Elements For Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)", 1997
- ACI committee 215, "consideration for design of concrete structure subjected to Fatigue Loading (ACI 334.1R-92)," American
- [۹] امور مسکن و ساختمان وزارت مسکن و شهرسازی "مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان"، نشر توسعه ایران، شهریور ۱۳۸۵ .
- [۴] شاپور طاحونی " طراحی ساختمانهای بتن مسلح"، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، بهار ۱۳۸۲.
- [۵] Osma, Hassan, "Train-induced Ground-borne vibration and Noise in Building" ISBN 090, 2007
- [۶] ISO 14837-1, "mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail system—part 1: General guidance", 2005
- [۷] Hildebrand, Robert, "Countermeasures Against Railway Ground and Track Vibrations", 2001
- [۸] Gupta, S., and Degrade, G., and Lombaert, G., "Experimental validation of a numerical model for subway induced vibration", journal of sound vibration, Vol 321, pp 768-812, 2009