رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره هشتم، شماره اول ۱۴۰۳، صفحه: ۱۴-۳۱

اثر ارتعاشات قطار بر ساختمان‌های با مصالح بنایی مجاور خطوط آهن

علیرضا آقائی فر [*۱]، ***رضا ضیاء توحیدی*** [۲]، ***عباسعلی صادقی*** [۲]

[*۱] *مربی، بخش فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران*

[۲] *گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران*

(alireza.aghaeifar@pnu.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴)

چکیده

معمولا ارتعاشات زمینی ناشی از حرکت قطار بر روی خط آهن، درون زمین منتشر می‌شوند. در برخی مناطق در مجاورت خط، ساختمان‌هایی وجود دارد، که ارتعاشات مذکور در آنها باعث ایجاد لرزش ساختمان می‌شود. در کشور ما بسیاری از ساختمان‌های مجاور خطوط آهن از مصالح بنایی ساخته شده‌اند. یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان لرزش ساختمان مجاور ریل، سرعت قطارهای عبوری می باشد. با توجه به برنامه وزارت راه و شهرسازی در احداث و توسعه مسیرهای ریلی با اولویت قطار سریع‌السیر، نتایج بررسی‌های پژوهش کاربردی خواهد بود. در راستای بررسی ارتعاشات ناشی ار حرکت قطارها بر ساختمان‌های با مصالح بنایی، ابتدا ساختمان‌های با مصالح بنایی مجاور خط‌آهن مسیر تهران – مشهد که در طرح قطار سریع السیر می باشد با شعاع ۲۰ متر، بر اساس گوگل مپ لیست شده‌اند. سپس به بررسی پیشینه‌ی ادبیات فنی موضوع پرداخته شده است. در ادامه پیشینه موضوع، با روش طوفان مغزی، ساختمان‌های با مصالح بنایی مجاور خطوط آهن مورد بررسی تکمیلی قرار گرفته‌اند. در انتها نتایج بررسی‌های ادبیات فنی موضوع، به صورت جدول و مروری ارائه شده است.

کلمات کلیدی

ساختمان با مصالح بنایی، ارتعاشات، خطوط آهن، قطار.

The Effect of Train Vibrations on Buildings with Masonry Materials in the Vicinity of Railways

Alireza Aghaeifar [1*], Reza Zia Tohidi [2], Abbasali Sadeghi [2]

*[*1] Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran*

[2] Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

(alireza.aghaeifar@pnu.ac.ir)

(Date of received: 29/12/2023, Date of accepted: 13/05/2024)

ABSTRACT

Usually, the ground vibrations caused by the movement of the train on the railway are spread inside the ground. In some areas, there are buildings in the vicinity of the line, where the mentioned vibrations cause the building to vibrate. In our country, many buildings near railway lines are made of building materials. One of the influencing factors on the amount of vibration of the building adjacent to the rail is the speed of the passing trains. According to the plan of the Ministry of Roads and Urban Development in the construction and development of railway routes with the priority of high-speed trains, the results of the research will be useful. In order to investigate the vibrations caused by the movement of trains on buildings with construction materials, first the buildings with construction materials adjacent to the Tehran-Mashhad railway line, which is in the high-speed train plan, with a radius of 20 meters, were listed based on Google Maps. Then, the background of the technical literature of the subject has been investigated. In the continuation of the background of the subject, with the brainstorming method, buildings with building materials adjacent to railway lines have been further investigated. At the end, the results of the technical literature reviews are presented in the form of a table and overview.

Keywords:

Masonry building, Vibrations, Railway lines, Train.

۱- مقدمه

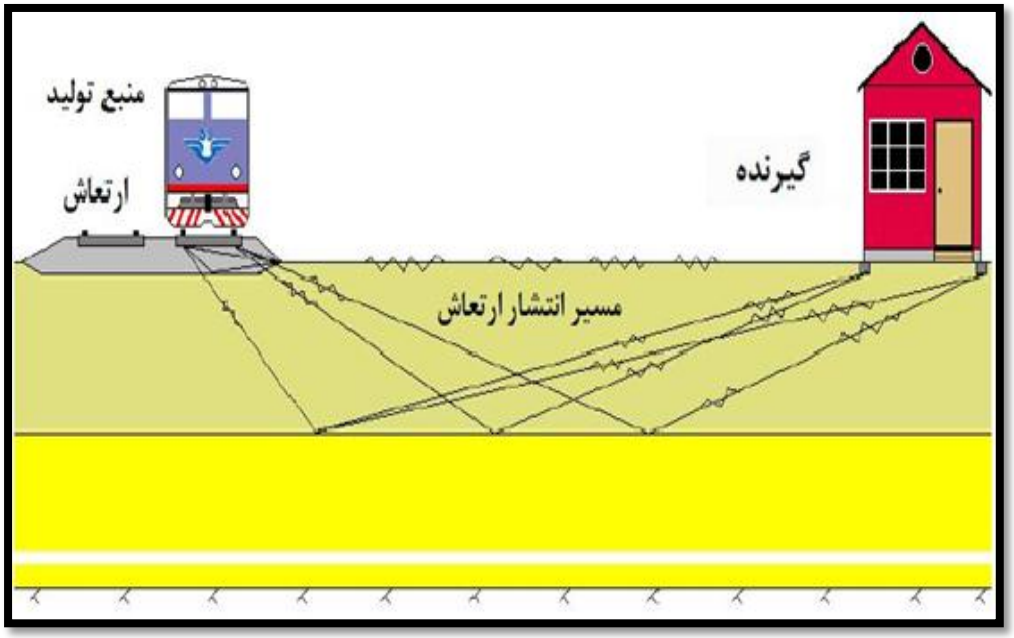
حرکت قطار بر خط‌آهن به عنوان یکی از منابع تولید ارتعاش شناخته می‌شود. ارتعاشات مذکور می‌تواند اثرات نامطلوبی بر ساختمان‌های مجاور وارد نماید. با توجه به‌این‌که در کشور ما، بسیاری از ساختمان‌های مجاور خطوط آهن از مصالح بنایی ساخته شده‌اند، بررسی ارتعاشات ناشی از حرکت قطار بر خطوط آهن در ساختمان‌ها با مصالح بنایی ضروری به نظر می‌رسد. شدت ارتعاشات به عوامل متعددی بستگی دارد. مشخصات مکانیکی و هندسی قطار نظیر وزن، سرعت، فاصله بین چرخ‌ها، ناهمواری و فرسودگی چرخ‌ها، شکل آیرودینامیکی قطار از جمله‌این عوامل می‌باشد. ارتعاشات ایجادشده در منبع تولید ارتعاش از طریق خاک به ساختمان‌های مجاور منتقل می‌شود.[2]. ساختمان‌های با مصالح بنایی شامل ساختمان‌های زیر می‌باشد:

الف - ساختمان بنایی مسلح: ساختمان بنایی مسلح ساختمانی است که با آجر، سنگ یا بلوک سیمانی یا ترکیبی از آن‌ها ساخته شده و در آن میلگردهای فولادی به همراه مصالح بنایی برای تحمل نیرو به کار می‌روند.

ب- ساختمان بنایی محصور شده با کلاف: ساختمانی که با آجر، سنگ یا بلوک سیمانی یا ترکیبی از آن‌ها ساخته شده و در آن تمام بارهای قائم و نیروهای جانبی توسط دیوارها تحمل می‌شوند. کلاف‌ها در این ساختمان‌ها با نقش محصورکنندگی خود باعث افزایش یکپارچگی و شکل‌پذیری دیوارها می‌شوند.

پ- ساختمان بنایی غیرمسلح: که در ساخت آن از آجر، بلوک سیمانی، سنگ و یا خشت استفاده شده و در آن دیوارها فشار ناشی از بارهای قائم و تا حدودی برش ناشی از نیروهای جانبی را تحمل می‌کنند.

مبنای‌سنجش ارتعاشات حاصل از قطار سرعت یا شتاب ذره می‌باشد که به واحد متر بر ثانیه یا متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. حداکثر سرعت ذره اغلب به عنوان پارامتری برای ارزیابی تاثیرات ارتعاشات بر سازه‌های ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.[۱]



شکل۱: امواج منتشر شده زمین برد مربوط به قطار تاثیرگذار بر ساختمان مجاور[1]

با توجه به‌این‌که غالب ساختمان‌های مجاور خطوط آهن در ایران از مصالح بنایی ساخته شده‌است نیز با عنایت به‌این‌که بهره‌گیری از قطارهای سریع‌السیر دردستورکار وزارت راه و شهرسازی می‌باشد، به منظور برآورد آسیب‌های احتمالی و پیش‌بینی تعمیرات لازم در راستای کاهش این آسیب‌ها، لازم می‌آید ارتعاشات ناشی از حرکت قطارهای سریع‌السیر بر ساختمان‌های مجاور ساخته شده با

مصالح بنایی مورد مطالعه قرارگیرد. در صورت ضرورت تقویت ساختمان‌های فرسوده مجاور خطوط آهن در شرایط به کارگیری قطارهای سریع‌السیر، از جمله راهکارهای کاهش آسیب می‌توان طراحی ترانشه در مسیر انتقال ارتعاش یا استفاده از لایه‌های میراگر در زیر خطآهن یا تقویت سازه‌ای ساختمان با مصالح بنایی از طریق روکش بتن مسلح یا صفحات FRP نام‌برد. [۱۱و۱۲]

۲- ساختمان‌های با مصالح بنایی مجاور خط آهن مسیر مشهد-تهران

در این بررسی به شناسایی ساختمان‌های اطراف مسیر ریلی قطار مشهد-تهران پرداخته شده‌است که در مسیر توسعه و تبدیل به قطار سریع‌السیر می‌باشد. این بررسی بر اساس گوگل مپ انجام‌گرفته‌است. در این بررسی به شناسایی ساختمان‌های با مصالح بنایی و همچنین ساختمان‌های روستایی در بافت‌های شهری وروستایی(با تمرکز بر بافت‌های روستایی) با فاصله کمتر از ۲۰ متر از خطوط ریلی پرداخته شده‌است.

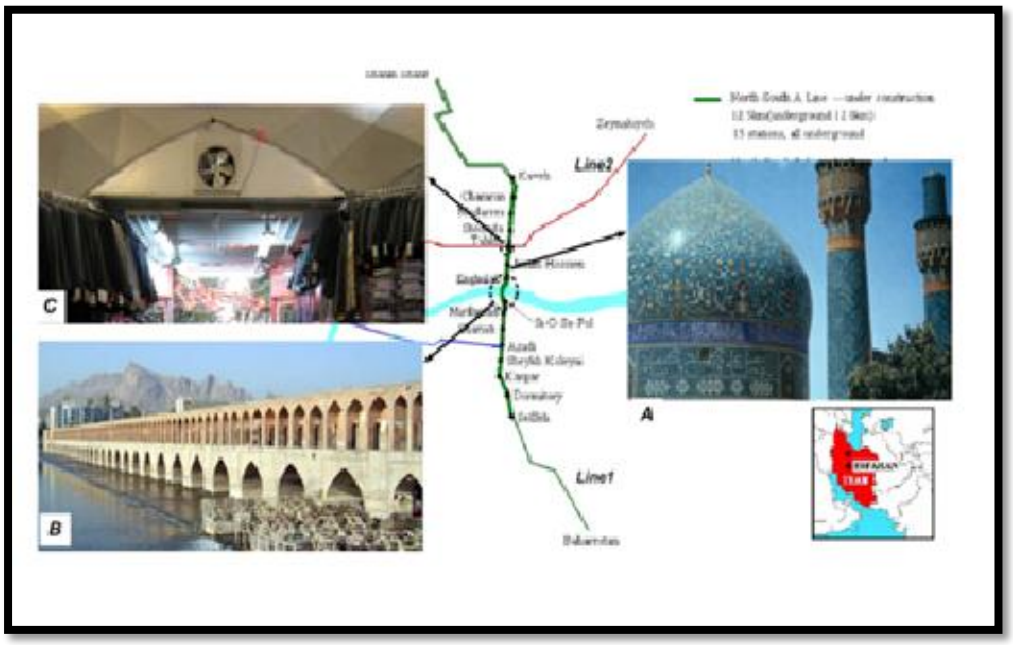
جدول ۱: کلیه ساختمانهای با مصالح بنایی با شعاع ۱۵ متر تا ۲۰ متر از مرکز خط آهن مشهد-تهران

موقعیت ساختمان	فاصله تقریبی از ریل	نوع سازه
خارج از مشهد و بعد از دیزباد، در فاصله حدود ۳۰۰ متری بعد از ایستگاه خیام	بین ۱۰ تا ۲۰ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
در روستای عبدالله آباد نیشابور	بین ۱۰ تا ۲۰ متر و کمتر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
قلعه نو مهر	حدود ۱۰ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
اطراف نیشابور (قبل و بعد از بلوار مهراباد)	بین ۱۰ تا ۲۰ متر	ساختمان های مسکونی
بعد از شهر نیشابور و در بزرگراه امام رضا	حدود ۱۵ متر	دیوارهای ساختمان باغی ویلایی با مصالح بنایی
بعد از نیشابور در جاده باتو	کمتر از ۱۵ متر	خانه روستایی (باغی) با مصالح بنایی
قبل از تقاطع جاده شم آباد به رحمت آباد با خط ریلی، در نزدیکی مسجد	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
روستای جوین	بین ۱۰ تا ۲۰ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
روستای کمایستان	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
روستای قلعه نو	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
شرکت پخش فراورده های نفتی در مسیر ریل و قبل از شاهرود	کمتر از ۱۵ متر	دیوارهای ساختمان با مصالح بنایی
روستای امام آباد (بعد از شاهرود)	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
بعد از ایستگاه سرخده در تقاطع جاده صالح آبادو و ریل	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
بعد از ایستگاه آبگرم	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
قبل از روستای کهن آباد	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
بعد از روستای محمد آباد	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
قبل از ایستگاه گرمسار	بین ۱۰ تا ۲۰ متر	ساختمان مسکونی (روستایی) با مصالح بنایی
روستای قلعه سین قبل از ورامین	کمتر از ۱۵ متر	ساختمان مسکونی و کارگاهی (روستایی) با مصالح بنایی

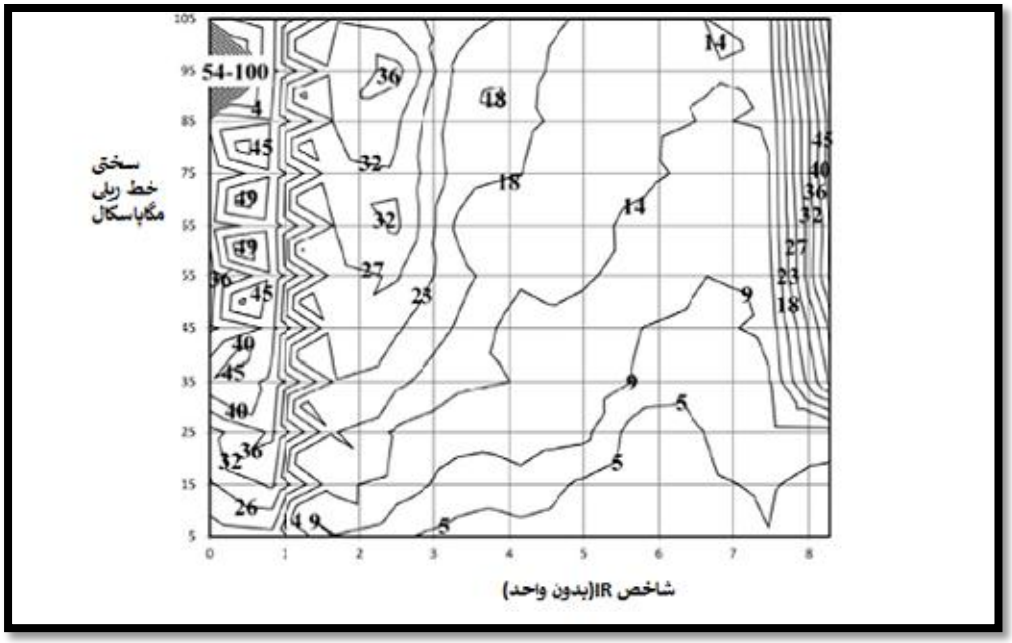
۳- پیشینه تاریخی موضوع در ادبیات لاتین

۳-۱- ساختمان‌های فرهنگی مجاور خطوط آهن با مطالعه موردی در اصفهان

صادقی و اسماعیلی در سال ۲۰۱۷، یک بررسی نظری و تجربی کامل با هدف توسعه نمودارهای پیش‌بینی فاصله ایمن مترو از ساختمانهای فرهنگی و تاریخی انجام‌دادند. از یک سو، متروها شرایط ترافیکی را در شهرهای جهان کاهش می‌دهند و صنعت گردشگری را تقویت می‌کنند. از سوی دیگر، احتمال آسیب‌های جدی به سازه‌های فرهنگی و تاریخی توسط ارتعاشات ناشی از مترو وجود دارد. اهمیت و وسعت آسیب‌های مترو به سازه‌های فرهنگی و تاریخی با ارزیابی نتایج قبلی در اصفهان نشان داده‌شده‌است. اگرچه مطالعات مختلفی در مورد ویژگی‌های ارتعاش متروها انجام‌شده‌است و اقدامات متعددی برای حفاظت از سازه‌های فرهنگی و تاریخی توسط صنایع راه‌آهن در نظر گرفته‌شده‌است، اما هنوز بررسی کافی در مورد روش‌ها یا اقداماتی است که توسط آن، فاصله ایمن مترو از سازه‌های فرهنگی و تاریخی حاصل شود، انجام‌نشده‌بود. [۳] برای این‌منظور ، یک مدل المان محدود از محیط شهر اصفهان در نظرگرفته شده است. اعتبار مدل با مقایسه نتایج آن با نتایج یک اندازه‌گیری میدانی جامع انجام شده در این تحقیق تأیید شده است. از طریق تجزیه و تحلیل پارامتری مدل، فاصله‌ایمن به عنوان تابعی از ویژگی‌های مترو، خواص ژئوتکنیکی محیط بین مترو و ساختمان‌های فرهنگی و تاریخی، و نوع این ساختمان‌ها توسعه یافته است.



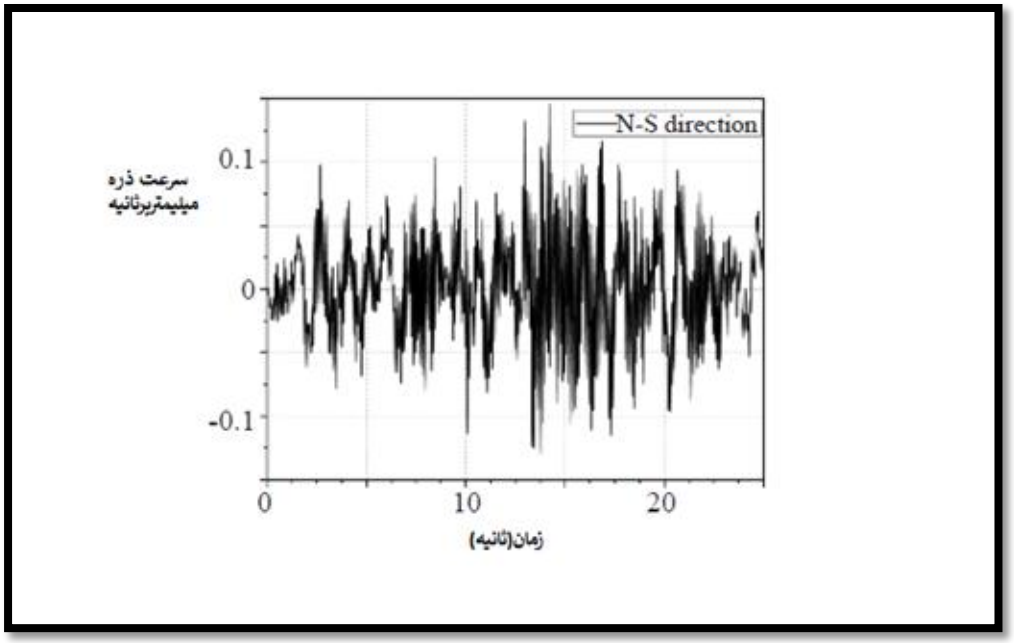
شکل۲: برخی سازه‌های تاریخی اصفهان نزدیک به مترو در بررسی جواد صادقی و محمد حسن اسماعیلی[۳]



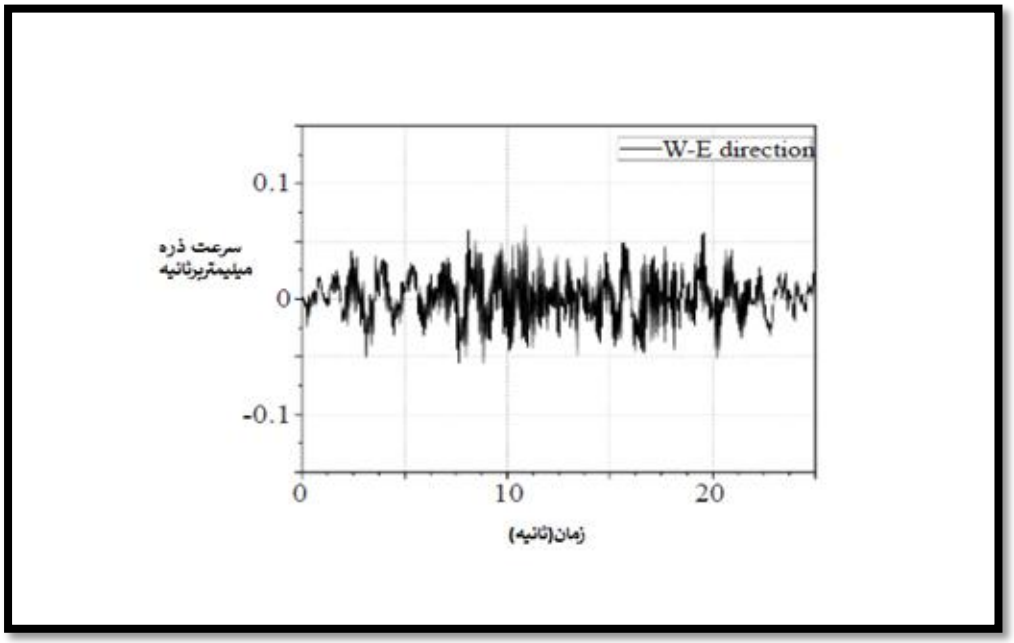
شکل ۳: نموگرام فاصله ایمن سازه تاریخی از مترو در سازه‌های تاریخی در بررسی جواد صادقی و محمد حسن اسماعیلی[۳]

۳-۲- اثر ارتعاشات قطار بر معبدی در چین

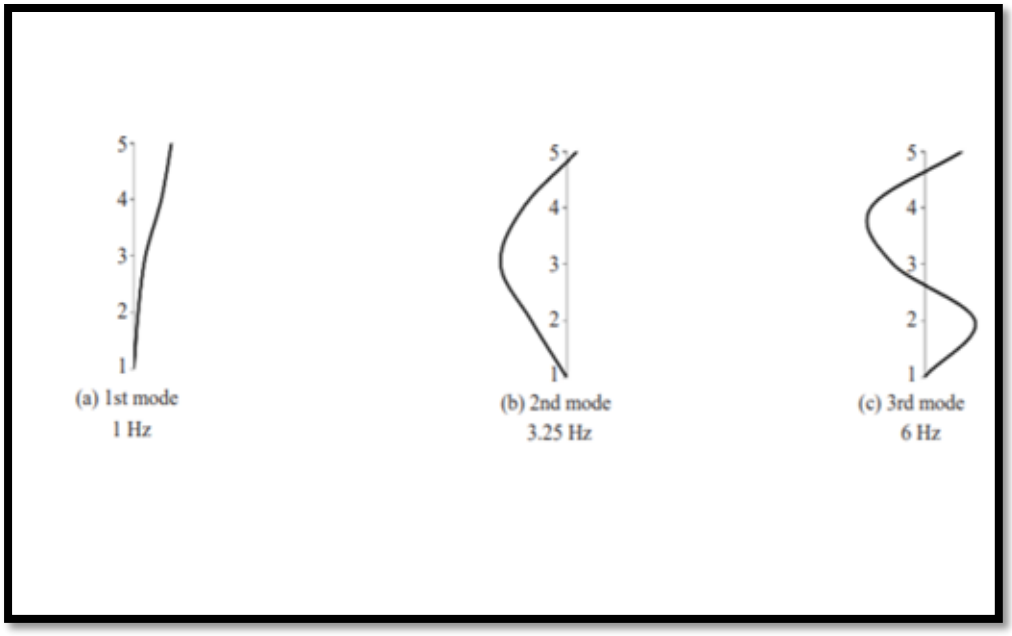
مینقانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱، بیان نمودند که ارتعاشات ناشی از قطار تأثیر پویا و بالقوه‌ای بر ساختمان‌های تاریخی داشته و بررسی این موضوع به‌ویژه در ساختمان‌هایی که ارزش تاریخی و فرهنگی بالایی‌دارند، حائز اهمیت می‌باشد که تحت بار بلندمدت ارتعاشات قطار، آسیب خستگی سازه‌ای می‌تواند در آن‌ها رخ‌دهد. بنابراین در این مقاله، تاثیر ارتعاشات قطار و رفتار دینامیکی معبدی در حومه پکن، که سابقه‌ای حدودا ۱۰۰۰ ساله دارد، مورد بررسی قرارگرفته‌است. برای بررسی رفتار دینامیکی این معبد و تعیین ضعیف‌ترین موقعیت در آسیب‌های سازه‌ای آن تحت بار قطار، ویژگی‌های دینامیکی آن اندازه‌گیری شده‌است.[۴] در نهایت، پاسخ‌های دینامیکی سازه ای به بارهای قطار متحرک در این مقاله به طور مفصل مورد تحلیل قرارگرفته و نتایج حاصل نشان‌می‌دهد که ضعیف‌ترین نواحی این معبد در مقابل ارتعاشات ناشی از حرکت قطار مربوط به پایین مناره و دروازه طبقه اول می‌باشد. همچنین کرنش‌های دینامیکی در زمین و ساختمان‌های مجاور مربوط به ارتعاشات ناشی از سیستم‌های ریلی بسیار کم هستند و در محدوده‌ای هستند که زمین و خاک رفتار الاستیک خطی تقریباً ایده‌آلی از خود نشان می‌دهند و خاک رفتار پلاستیک نشان نمی دهد. پاسخ‌های ارتعاشی همین معبد تحت حرکت قطار توسط ژیا و همکاران در سال ۲۰۲ مورد بررسی قرارگرفته‌بود. بر این اساس، یک مدل عددی با استفاده از ANSYS برای محاسبه بیشتر پاسخ دینامیکی معبد ایجاد شد و ایمنی و یکپارچگی معبد بر اساس استانداردهای موجود ارزیابی شده است.[۵] اندازه‌گیری در هر طبقه ترتیب داده‌شده، در مجموع ۱۰ نقطه اندازه‌گیری وجود داشت که یک حسگر افقی در هر نقطه اندازه‌گیری قرار داده‌شده‌است و سیگنال‌های سرعت ارتعاش در دو جهت افقی جمع‌آوری شدند. ضمناً یک حسگر عمودی و دو حسگر افقی در هر نقطه قرار داده‌شد تا سیگنال‌های شتاب را تحت‌تأثیر قطار جمع‌آوری کند. معبد در پارک قرار دارد که در طول آزمایش ورود برای بازدیدکنندگان ممنوع بود، بنابراین محیط آزمایش عاری از تداخل سایر سیگنال‌های ارتعاشی بود.



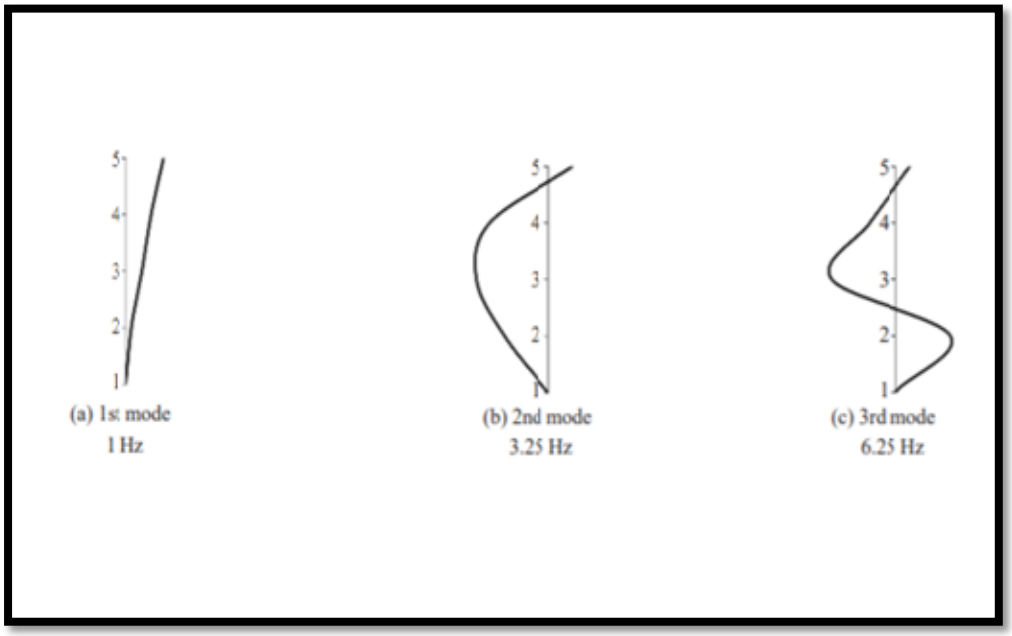
شکل۴: ارتعاش درجهت شمال وجنوب معبدبراثرعبورقطارها در بررسی مینقانگ و همکاران[۴]



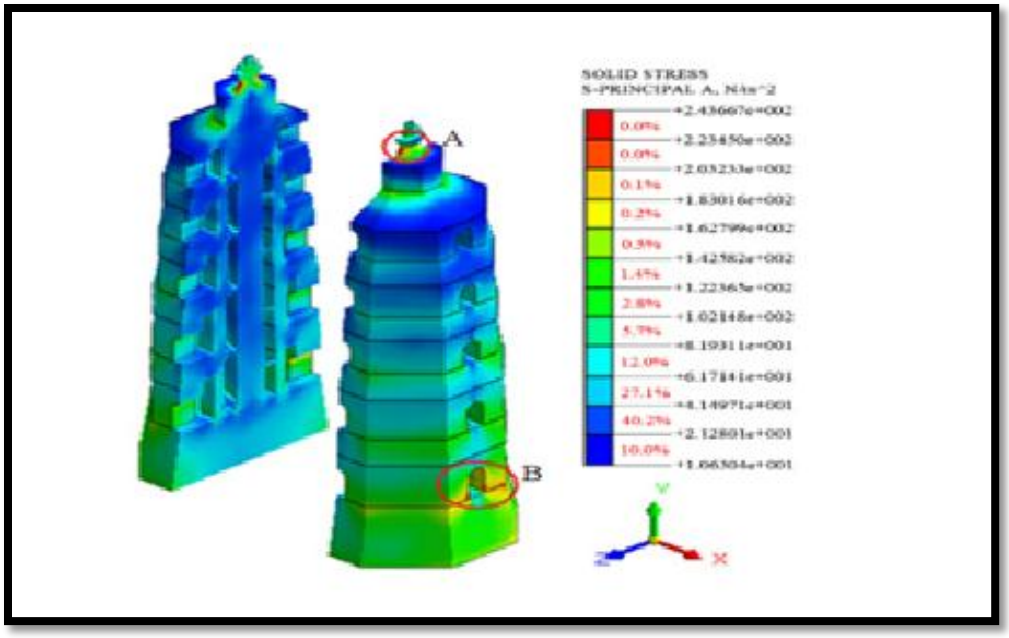
شکل۵: ارتعاش درجهت شرق و غرب معبد بر اثر عبور قطارها در بررسی مینقانگ و همکاران[۴]



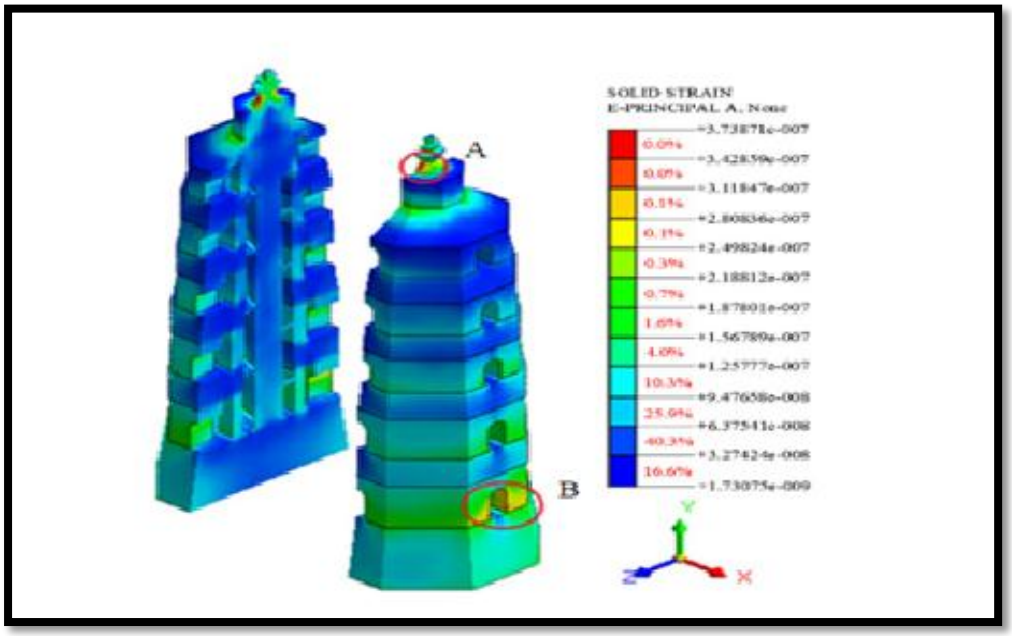
شکل۶: مد ارتعاشی معبد در فرکانسهای طبیعی اول تا سوم در جهت شرق-غرب در بررسی مینقانگ و همکاران[۴]



شکل۷: مد ارتعاشی معبد در فرکانسهای طبیعی اول تا سوم در جهت شمال-جنوب در بررسی مینقانگ و همکاران[۴]



شکل۸: دیاگرام تنش در معبد بر اثر تردد قطارها در بررسی ژیا و همکاران[۵]

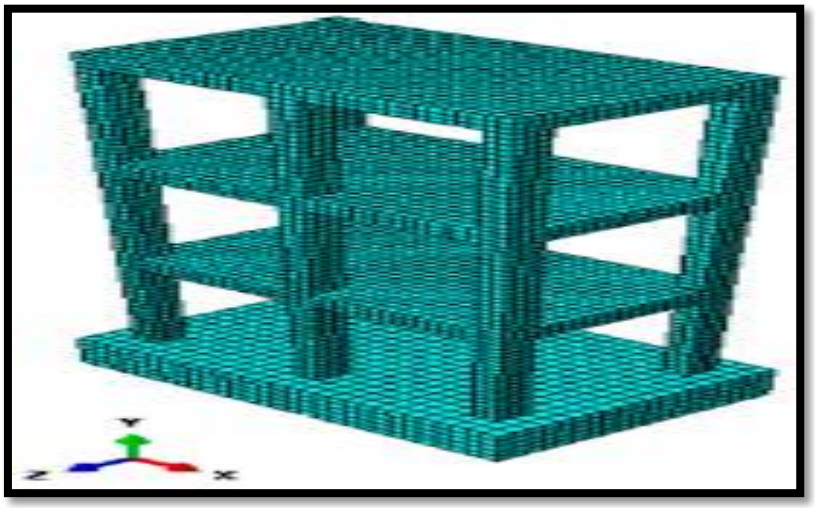


شکل۹: دیاگرام کرنش در معبد بر اثر تردد قطارها در بررسی ژیا و همکاران[۵]

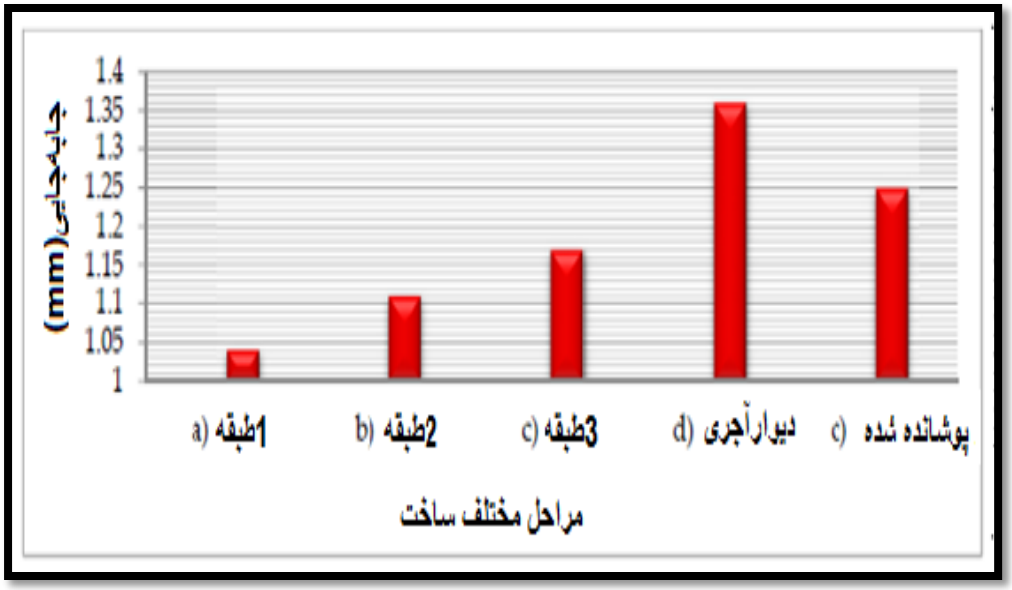
۳-۳- تاثیر پوشش گچ بر کاهش ارتعاشات ریلی بر ساختمان بنایی مجاور خطوط آهن

رودان و همکاران در سال ۲۰۱۹ نمونه‌آزمایشی، یک ساختمان را مورد بررسی میدانی و همچنین نرم‌افزاری قراردادند. تحلیل مرحله‌ای ساخت، با افزودن یک طبقه به سازه در هر مرحله انجام شده‌است. بعد از طبقه سوم، برای کل ساختمان دیوارهای آجری بنا شده‌اند و در مرحله‌آخر، تمام دیوارهای خارجی با گچ پوشانده شده‌است. مراحل اصلی ساخت ساختمان، به سه مرحله تقسیم‌بندی می‌شود: فقط اسکلت، دیوارآجری، آجری پوشانده‌شده با گچ می‌باشد. [۶] در مطالعه، رفتار دینامیکی مراحل مختلف ساخت، از جمله دیوارآجری، دیوار پوشانده‌شده از گچ و فقط با اسکلت با استفاده از روش المان‌محدود و نرم افزار ABAQUS، بررسی‌شده‌است. نتایج میدانی با نتایجABAQUS به‌طور قابل ملاحظه‌ای تطابق دارند و خطای‌نسبی آن‌ها کمتر از ۶٪ می‌باشد. با مقایسه جابجایی‌ها برای تحلیل هر کدام از مراحل ساخت، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار جابجایی‌های آن‌ها وابسته به سطح طبقه و دیوار مصالح بنایی است. حداکثر تنش‌اصلی به وضوح نسبت به نوع بدون لایه‌گچ، هیچ انحرافی از خود نشان نمی‌دهد، اگرچه جابجایی‌ها در حالت با پوشش‌گچ در شرایط مشابه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از بدون پوشش‌گچ می‌باشد.

شکل۱۰: ساختمان مورد بررسی دربررسی رودان و همکاران[۶]



شکل۱۱: مش‌بندی ساختمان در بررسی رودان و همکاران[۶]



شکل۱۲: نتایج جابجایی در ساختمان در بررسی رودان و همکاران[۶]

۳-۴- مقرکنترل سیگنال در نزدیکی خطآهن در پاکستان

سازه مورد بررسی توسط خان و همکاران در سال ۲۰۱۹، ساختمان مقر کنترل سیگنال‌ها در نزدیکی خطآهن پاکستان بود. بازدید ساختمان هیچ ترکی را نشان نمی‌دهد که در نتیجه هیچ حادثه مانند زلزله و طوفان به آن آسیب نرسانده‌است. ساختمان با مصالح بنایی در نزدیکی خطآهن انتخاب شده که از مسیر خطآهن، ۱۰ متر فاصله دارد. سیستم ردیابی دینامیک شامل ۵ شتاب سنج می‌باشد. [۷] مدل‌سازی المان‌محدود با استفاده از نرم‌افزارSAP2000 به انجام رسیده‌است تا پاسخ دینامیکی سازه مورد بررسی را شبیه‌سازی نماید. اختلاف فرکانس‌های مودال، شکل مودهای ارتعاشی تحت تاثیر ارتعاشات خطآهن، در مقایسه نتایج حاصل از شتاب سنج‌ها با مدل المان‌محدود تقریبا قابل چشم‌پوشی است.

الف

ب

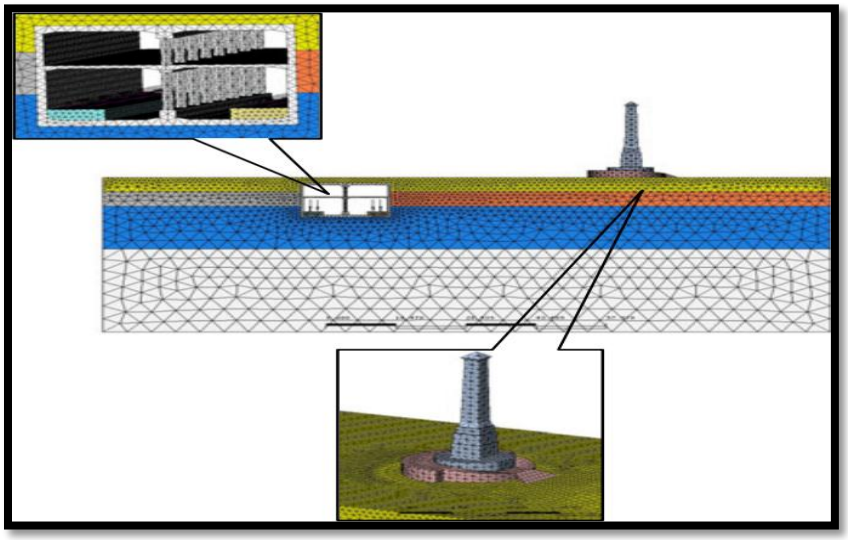
شکل۱۳: الف نمای روبرو و ب نمای پشت مطالعه موردی در بررسی خان و همکاران[۶]

شکل۱۴: عبور قطار از کنار یک کابین مصالح بنایی مجهز شده در بررسی خان و همکاران[۷]

۳-۵- سازه‌بنایی تاریخی مجاور ریل در چین

اثرات کوتاه مدت و طولانی مدت ارتعاشات قطار می‌تواند منجر به آسیب‌هایی نظیر شکست مواد ساختمانی یا نشست فونداسیون در ساختمان‌های تاریخی شود. مارکین و همکاران در سال ۲۰۱۱، دو نوع خرابی سازه‌ای و خرابی معماری برای ساختمانی تاریخی مورد بررسی قرار داده اند.سازه‌بنایی تاریخی در مرکز شهر چنجو در چین واقعا شده‌است. [۸] مقدار حداکثر سرعت ذره ارتباط مستقیمی با شکست‌های رخ داده در ساختمان‌ها دارد، مقادیرحداکثر سرعت ذره‌ه بین ۳ و ۱۰ میلیمتر بر ثانیه به صورت معمول آسیب‌های سازه‌ای برای خرابی را در برندارند اما باعث آسیب‌های معماری می‌شوند. استاندارد ملی چین معیار ۰,۱-۰,۷۵ میلیمتر بر ثانیه را در نظر می‌گیرد، که اکنون یکی از سختگیرانه‌ترین مقادیر قبول در دنیا است و می‌تواند برای ارزیابی خرابی‌های معماری مورد استفاده قرارگیرد.

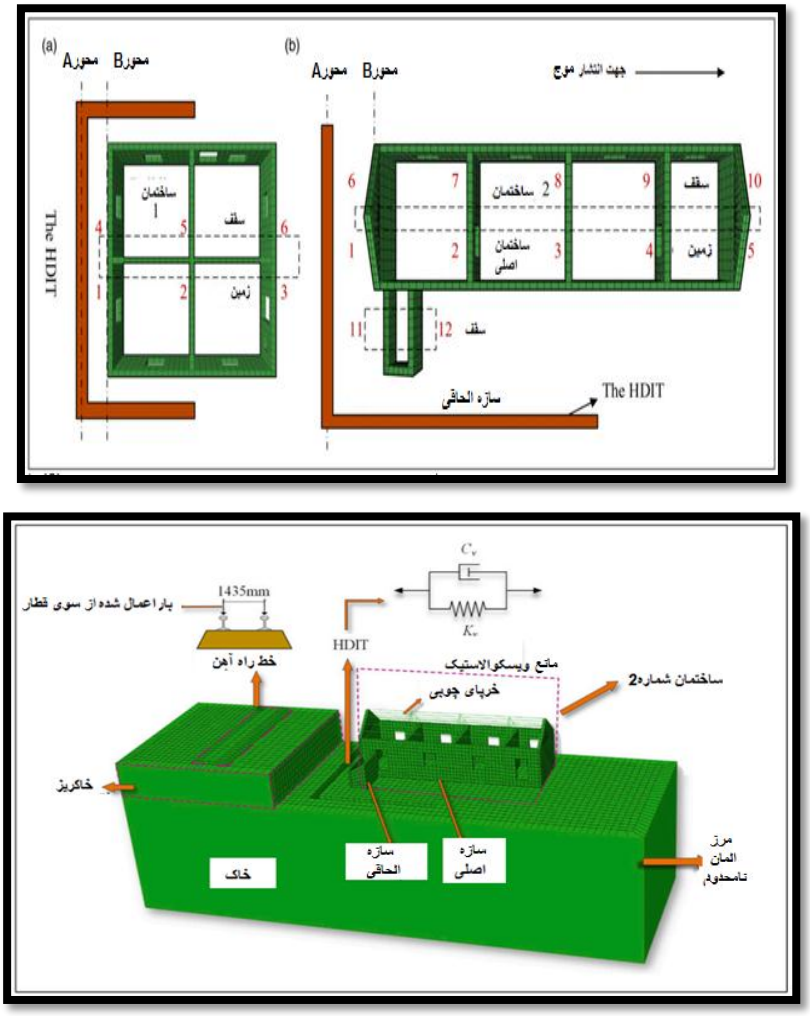
شکل۱۵: سازه‌بنایی مجاور خط اهن در بررسی مارکین و همکاران[۸]



شکل۱۶: مدل مش‌بندی سازه‌بنایی مجاورخط آهن در بررسی مارکین و همکاران[۸]

۳-۶- تاثیر نوع ترانشه بر کاهش اثر ارتعاشات ریلی بر ساختمان مجاور خطوط آهن

در بررسی لی و همکاران در سال ۲۰۲۲، یک پروژه شامل دو سازه‌بنایی یک طبقه که بیش از ۱۰۰ سال قدمت دارند که ساختمان۱ دارای پلان با سطح مقطع مربع و در فاصله ۸ متری از خط‌آهن قرار دارد و پلان ساختمان ۲کمی پیچیده‌تر از ساختمان ۱ می‌باشد که به غیر از قسمت اصلی با پلان مستطیلی شکل، یک سازه‌الحاقی به آن موجوداست. [۹] با توجه به مجاورت دو ساختمان با خط‌آهن هنگام عبور قطار لرزش در دو ساختمان احساس میشود و ترک‌های مشخصی در ساختمان‌ها مشاهده می‌شود. مدل‌های المان‌محدود سه بعدی برای دو ساختمان ایجاد شده‌است. در مدل‌های المان‌محدود علاوه‌بر ترانشه‌های U , L دو مدل دیگر نیز ساخته‌شده‌اند که در آن‌ها یک ترانشه خطی شکل با طول بلند وکافی مدل شده‌است. دیوارهای ساختمان‌ها به صورت مدل ماکرو مدل شده‌اند.نتایج بررسی‌های دو مدل ساخته‌شده با ترانشه‌های U , L و ترانشه‌های مستطیلی نشان می‌دهد که ترانشه با شکل U L ,مناسب‌تر است و در عین حال که کاهش ارتعاشات ریلی را به نحو مناسب ایجاد می‌کند.

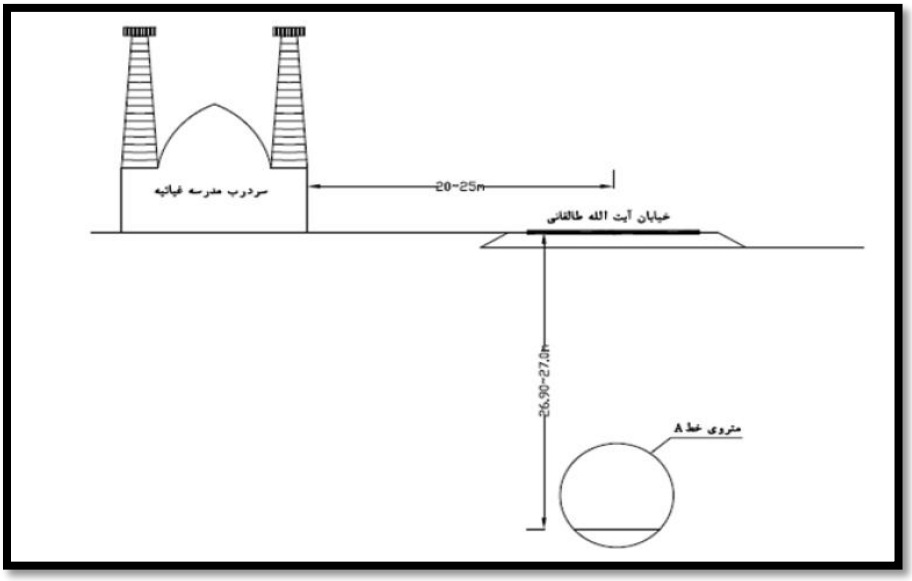


شکل ۱۷: ترانشه‌های ساختمان۱ و ۲ و همچنین مدل مش‌بندی ساختمان۲ در بررسی جین بااو و همکاران[۹]

۴- پیشینه تاریخی موضوع در ادبیات فارسی

۴-۱- مدرسه‌غیاثیه در قم مجاور مترو

در بررسی پیمان و همکاران در سال ۱۳۹۵، نتایج نشان داد که عبور قطار شهری قم از مجاورت مدرسه غیاثیه، اثر مخربی بر این سازه ندارد. با این حال راهکارهای لازم برای کاهش اثرات مخرب احتمالی بر این بنای تاریخی، که عبارتنداز کاهش سرعت حرکت قطار در محدوده سازه و نیز کاهش انتقال ارتعاش ایجاد شده از ریل به بستر با استفاده از روش‌های مختلف ارائه‌شده‌است. [۱۳] با توجه به استانداردهای موجود حداکثر مجاز سرعت ذره در بنای تاریخی مجاور خطوط‌اهن ۳ میلیمتر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به ضعف سازه‌ای ساختمان‌های تاریخی، خستگی ناشی از ارتعاش مداوم قطار می‌تواند برای این سازه‌ها بسیار خطرناک باشد. لذا توصیه می‌شود خط مترو، تا حد امکان از این بناها دور شود، یا مطالعات تکمیلی درباره اثر ارتعاشات بر این سازه‌ها بطور دقیق انجام‌پذیرد. هنگام بررسی اثر ارتعاشات بر یک بنای با ارزش قدیمی، بررسی دقیق زمین اطراف ساختمان، و تعیین مشخصات مکانیکی خاک آن دارای اهمیت اساسی است. علاوه بر این، لازم است که دوره‌تناوب طبیعی ساختمان محاسبه و با دوره تناوب حرکت زمین در نزدیکی آن مقایسه شود.



شکل۱۸: موقعیت مدرسه غیاثیه نسبت به تونل مترو در بررسی پیمان و همکاران[۱۲]

۴-۲- بررسی ریزارتعاشات ریلی بر مسجدی قدیمی در محله شمیران تهران

آزادی و همکاران در سال ۱۳۹۵با اندازه‌گیری ریزارتعاشات محیطی، مشخصات دینامیکی و آسیب‌پذیری سازه‌ای قدیمی با کاربری مسجد در محله دروازه شمیران تهران را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری ریزارتعاشات توسط شتاب‌سنج‌ها انجام‌شد. [۱۴] ریزارتعاشات اندازه‌گیری شده بر اساس استانداردهای موجود مورد بررسی قرارگرفت که در نتیجه آن مشاهده شد که تمامی حداکثر سرعت‌های ذره ایجاد شده در قسمت‌های مختلف سازه توسط حرکت قطار در محدوده مجاز هستند. این نتایج نشان می‌دهد که حرکت قطار به طور مستقیم و آنی تاثیر تخریبی روی سازه قدیمی با کاربری مسجد ندارد، اما تاثیرات جانبی این لرزش‌های مداوم باید مورد توجه باشند.

شکل۱۹: سنسور اندازه‌گیری ارتعاش که در شبستان مسجد جانمایی شده‌است در بررسی آزادی و همکاران[۱۳]

۵- استفاده از طوفان مغزی با تاکید بر اثر ارتعاش قطار بر ساختمان‌های با مصالح بنایی

با به کارگیری روش طوفان مغزی موارد جدید برای ساختمان با مصالح بنایی به شرح زیر می باشد:

۵-۱- تاثیر اندود داخلی و خارجی دیوارها بر کاهش ارتعاشات ریلی بر ساختمان بنایی مجاور خطوط آهن

همانطور که در ۳-۳ ذکر شد، بر اساس نتیجه تحقیقات رودان و همکاران، اندود گچ تاثیر مشهودی بر کاهش آسیب از نوع جابجایی در این ساختمان‌ها دارد.[۶] لذا پیشنهاد می‌شود، برای کاهش آسیب ساختمان‌های با مصالح بنایی در معرض ارتعاش ناشی از حرکت قطارها، با ملات‌های معمول اندود داخلی و همچنین اندود خارجی بر روی دیوارها انجام شود. قاعدتا با استفاده از اندود داخلی و خارجی، جابجایی‌ها کاهش و ترک‌های ایجاد شده در اثر ارتعاش کاهش خواهد یافت.

۵-۲- مدل سازی ساختمان با مصالح بنایی مجاور خطوط آهن با نرم افزار

در تحقیقات مختلف ذکر شده که از نرم افراز برای مدل‌سازی ساختمان بنایی مجاور ریل استفاده شده است. توصیه شده است که ساختمان‌های با شعاع حداقل ۱۵ متر از وسط خطوط آهن مودر بررسی و ارزیابی قرار گیرند.[۱۵] لذا پیشنهاد می‌شود در احداث و توسعه خطوط آهن، ساختمان‌های با مصالح بنایی به همراه محدوده‌ای از خاک تحت تاثیر ارتعاشات ریلی در زیر ساختمان مدل شوند و مورد بررسی نرم‌افزاری قرار گیرند.طبق تحقیقات پیشینه موضوع و همچنین بررسی‌های بعمل آمده نرم‌افزارهای ABAQUS وSAP2000 و ETABS قابلیت‌های ویژه‌ای برای مدل‌سازی ساختمان‌ها یا دیوارهای با مصالح بنایی مجاور تحت تاثیر ارتعاشات ریلی دارند و در حال حاضر در بررسی نرم‌افزاری موارد مشابه استفاده از روش المان محدود رایج است. همچنین پیشنهاد می‌شود در مواردی که ساختمان با مصالح نهایی در مجاورت خطوط آهن با شعاع ۱۵ متر در دست احداث یا بهسازی یا مقاوم‌سازی باشد، مورد بررسی مدل المان محدود نرم‌افزاری قرار گیرد.

۵-۳- حد آسیب به ساختمان با مصالح بنایی مجاور خطوط آهن

در منابع مختلف حد آسیب به معماری و حد آسیب سازه‌ای به ساختمان‌های با مصالح بنایی مجاور خطوط آهن، از سرعت ذره ۱ میلیمتر بر ثانیه تا سرعت ذره ۱۰ میلیمتر بر ثانیه ذکر شده است. بروز آسیب‌هایی در بازه ۱ میلی‌متر بر ثانیه تا ۴ میلی‌متر بر ثانیه در ساختمان‌های مجاور خطوط آهن گزارش شده است.[۱و۱۵و۱۰و۱۳] حد آسیب برای حداکثر سرعت ذره ارتعاش که به پی یا فونداسیون ساختمان بنایی مجاور ریل می‌رسد، مدنظر است. سرعت ذره ارتعاش در ساختمان به خوبی توسط نرم‌افزارهایی که در مورد قبلی ذکر شده، قابل بررسی می‌باشد، همچنین توسط سنسورهای سنجش ارتعاش قابل رصد میدانی می‌باشد. بر اساس حساسیت ساختمان‌های بنایی و قدمت زیاد بعضی ساختمان‌های تاریخی تحت تاثیر ارتعاشات ریلی، پیشنهاد می‌شود، معیار آسیب به ساختمان با مصالح بنایی کمتر از ۱ میلیمتر بر ثانیه در حدّ ایجاد ترک در نظر گرفته شود. همانطور که در ۳-۵ ذکر شده استاندارد ملی چین معیار سخت‌گیرانه ۰/۷۵ تا ۰/۱ میلیمتر بر ثانیه در حد ایجاد ترک را در نظر گرفته است.[۸]

۶- خلاصه ای از پیشینه فنی تحقیق

جدول ۲: مروری بر پیشینه فنی موضوع اثر ارتعاشات قطار بر ساختمان‌های با مصالح بنایی مجاور خطوط آهن

نام پژوهشگر	محل مطالعه موردی	سال انتشار	ادبیات لاتین یا فارسی	نوع پژوهش
مارکین و همکاران	سازه ای بنایی در چین	2011	لاتین	نرم‌افزاری
پیمان و همکاران	مدرسه غیاثیه قم در ایران	2016	فارسی	مقایسه با منابع
آزادی و همکاران	مسجدی در شمیران تهران در ایران	2016	فارسی	اندازه‌گیری میدانی
صادقی و اسماعیلی	ساختمانهای تاریخی اصفهان در ایران	2017	لاتین	اندازه‌گیری میدانی به همراه مدل المان محدود نرم افزاری
رودان و همکاران	ساختمان با مصالح بنایی بنایی در هند	2019	لاتین	اندازه‌گیری میدانی به همراه مدل المان محدود نرم افزاری
خان و همکاران	ساختمان با مصالح بنایی در پاکستان	2019	لاتین	اندازه‌گیری میدانی به همراه مدل المان محدود نرم افزاری
ژیا و همکاران	معبدی در چین	2020	لاتین	اندازه‌گیری میدانی به همراه مدل المان محدود نرم افزاری
مینقانگ و همکاران	همان معبد ردیف قبلی در چین	2021	لاتین	اندازه‌گیری میدانی به همراه مدل المان محدود نرم افزار
لی و همکاران	دو ساختمان بنایی بسیار قدیمی در چین	2022	لاتین	اندازه‌گیری میدانی به همراه مدل المان محدود نرم افزاری

۷- مراجع

1- Mahdi Bahrkazemi, "train induce ground borne vibration and its prediction",Dept. of Civil and Architectural Eng., 2004

2- Lutz Aursch , "Simple and fast predictibn of tain-induced track fofces, ground and building vibration" , Rail. Eng. Science , 2020

3- Javad Sadeghi and M. Hassan Esmaeili,” Safe distance of cultural and historical buildings from subway lines”, Jornal Soil Dynamics and Earthquake Eng.,2017

4- LI Minghang and Ma Meng and Cao Zhonglei and Xia Qian and Liu weining , "Dynamic response analysis of train-iduced vibration impact on the probhutaratna pagoda in Beijing" , Earthquake Eng and Eng vibration , 2021
5- Xia, Q., Zhao, J., Wang, D., & Li, Y. (2020). Analysis of Dynamic Response and Fatigue Life of Masonry Pagoda under the Influence of Train Vibration. Advances in Civil Engineering, 2020, 1-18.
6-Roudane, B., Adanur, S., & Altunışık, A. C. (2019). Numerical modeling of masonry infilled reinforced concrete building during construction stages using Abaqus software. Buildings, 9(8), 181.
7-Khan, B. L., Farooq, H., Usman, M., Butt, F., Khan, A. Q., & Hanif, A. (2019). Effect of soil–structure interaction on a masonry structure under train-induced vibrations. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 172(12), 922-934.
8-Ma, M., Markine, V., Liu, W. N., Yuan, Y., & Zhang, F. (2011). Metro train-induced vibrations on historic buildings in Chengdu, China. Journal of Zhejiang University-Science A, 12(10), 782-793.
9-Li J, Hu Z, Xu Z, Guo Y. Three-dimensional dynamic analysis of ancient buildings with novel high damping isolation trenches. Journal of Vibration and Control. 2022;28(17-18):2409-2420.
10-Hildebrand, Robert,"Coountermeasures against railway ground and track vibration",2001.
۱۱-علیرضا آقائی فر، "ارزیابی کاربرد لایه های میراگر جهت کاهش ارتعاشات ریلی"، نشریه علمی و ترویجی فناوری حمل و نقل، شماره۲۵ پاییز و زمستان ۱۳۹۴.
۱۲-اصغر وطنی اسکوئی،کتاب "روش‌ها و جزئیات اجرائی بهسازی ساختمان‌ها در برابر زلزله، انتشارات دانشگاه شهید رجایی، ۱۳۹۸
۱۳-صفا پیمان، مرتضی حسین پور، و احمد اکبری. ۱۳۹۵. «بررسی اثر ارتعاشات قطار متروی شهر قم بر بنای تاریخی سر درب مدرسه غیاثیه.»
۱۴- آزادی، مژده و زرفام، پنام و جوادی، پاشا و آزادی، اصغر،۱۳۹۷،بررسی تاثیر ارتعاشات ناشی از حرکت مترو در ساختمان با اندازه گیری ریزلرزه ها،کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران،تهران.
۱۵- علیرضا آقائی فر، "ارزیابی اثر ارتعاشات قطار بر ساختملن های مجاور خطوط آهن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه اهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۸.