ارزیابی صدا و ارتعاش ناشی از عبور قطار در محدوده تاریخی تپه حصار دامغان

مقاله علمی - پژوهشی

*مسعود فتحعلی (نویسنده مسئول)، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
محمد حسین کبیری نصرآباد، دستیار تحقیقاتی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.fathali@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
صفحه ۱۰۸-۹۳

چکیده

عبور خطوط ریلی از مجاورت محوطه‌های تاریخی می‌تواند با ایجاد ارتعاش و آلودگی صوتی، آثار نامطلوبی بر پایداری سازه‌ای و ارزش‌های حفاظتی این محوطه‌ها برجای گذارد. ایستگاه دامغان در مسیر پرترافیک تهران–مشهد در مجاورت عرصه و حریم محوطه تاریخی تپه حصار دامغان واقع شده و عبور مستمر ناوگان ریلی در این محدوده، نگرانی‌هایی را از منظر حفاظت میراث فرهنگی و مدیریت بهره‌برداری ریلی ایجاد کرده است. هدف این پژوهش، ارزیابی میزان صدا و ارتعاش ناشی از عبور قطار در این محدوده و مقایسه نتایج با حدود مجاز استانداردهای مرتبط است. بدین منظور، مطالعات میدانی اندازه‌گیری ارتعاش و صوت در نقاط مختلف محوطه انجام و نتایج با معیارهای استاندارد تحلیل شد. نتایج نشان داد که در بخش‌هایی از محدوده تاریخی، سطوح ارتعاش و صدا فراتر از حدود مجاز قرار دارد. بر این اساس، نتایج پژوهش بیانگر آن است که تداوم بهره‌برداری ریلی در مجاورت محوطه‌های تاریخی نیازمند توجه ویژه به پایش، کنترل اثرات فیزیکی و اتخاذ راهبردهای مدیریتی مناسب برای حفاظت پایدار این محوطه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، تپه حصار، حمل‌ونقل ریلی، صدا، محوطه‌های تاریخی

۱- مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه شبکه‌های حمل‌ونقل، به‌ویژه خطوط ریلی پرترافیک، باعث قرارگیری سازه‌ها و محوطه‌های باستانی در معرض اثرات محیطی ناشی از ارتعاش و صدا شده است (فتحعلی، ۱۴۰۱). این اثرات معمولاً به دلیل حرکت قطارها، تماس چرخ و ریل، ناهمواری مسیر و عملیات نگهداری خطوط ایجاد می‌شوند و می‌توانند بر پایداری سازه‌ها، سلامت انسان و حفاظت از میراث فرهنگی تأثیر منفی بگذارند (Thompson,2008). محوطه‌های تاریخی حساس‌تر بوده و نیازمند تحلیل دقیق و مدیریت مهندسی هستند تا ضمن حفظ ارزش تاریخی، عملکرد خطوط ریلی نیز مختل نشود. یکی از محوطه‌های تاریخی برجسته ایران، تپه حصار دامغان، در دو کیلومتری جنوب شرق شهر دامغان واقع شده و قدمتی هفت هزار ساله دارد (Sarlak & Aghajani, 2017). کاوش‌های باستان‌شناسی در این منطقه نشان می‌دهد که تپه حصار از اواخر نوسنگی تا پایان عصر مفرغ سکونتگاه مهمی بوده و نقش برجسته‌ای در تولید و مبادلات فرهنگی فلات مرکزی ایران ایفا کرده است (Anisi, 2021 و Thornton, 2009). یافته‌های اخیر، شامل کشف گل‌نبشته‌های میخی و گورستان عصر آهن، اهمیت تاریخی و فرهنگی این محوطه را بیش از پیش آشکار می‌سازد. این منطقه، علاوه بر ارزش باستان‌شناسی، از نظر هویتی و فرهنگی نیز دارای جایگاه ویژه‌ای است و حفاظت از آن از اولویت‌های ملی محسوب می‌شود. همزمان با اهمیت تاریخی تپه حصار، خط ریلی تهران–مشهد و ایستگاه دامغان از داخل محدوده حریم و عرصه این محوطه عبور می‌کنند. کارشناسان معتقدند که عبور قطارها نه تنها می‌تواند به بافت تاریخی آسیب برساند، بلکه نگهداری، مرمت و پژوهش در این منطقه را نیز دشوار می‌سازد (Anisi, ۲۰۲۱; Moradi et al., ۲۰۲۴; Sarlak & Aghajani, ۲۰۱۷). از سوی دیگر، ایستگاه دامغان

بخشی از شبکه پرترافیک ریلی کشور است و توسعه یا ارتقای خطوط بدون بررسی اثرات محیطی و میراثی، می‌تواند خسارات بلندمدت ایجاد کند. بنابراین، مطالعه همزمان اثرات ارتعاش و صدا امری ضروری است (Hanson et al., ۲۰۱۲). نمایی از منطقه تاریخی تپه حصار در شکل ۱ نشان داده شده است.

مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که اثرات ارتعاش و صدا باید بر اساس چارچوب منبع–مسیر–گیرنده تحلیل شوند، به‌گونه‌ای که علاوه بر شدت ارتعاش در منبع، ویژگی‌های خاک و پاسخ سازه‌ای دریافت‌کننده نیز لحاظ شود (Sun et al., ۲۰۲۲; Vogiatzis & Kouroussis, ۲۰۱۷; Wei et al., ۲۰۲۲). ارتعاشات و صدای ناشی از قطارها، بسته به نوع و وزن واگن، سرعت حرکت و شرایط مسیر، می‌تواند به میزان قابل توجهی از حدود مجاز استاندارد فراتر رود و به سلامت انسان و پایداری سازه‌ها آسیب وارد کند (Csortos, ۲۰۲۳). راهکارهای کاهش ارتعاش و صدا، مانند فرش زیر بالاست، دیوارهای صوتی و سیستم‌های شناور خط، می‌توانند تا حدی این اثرات را کاهش دهند، اما محدودیت‌های فضایی و میراثی در محوطه‌های تاریخی، انتخاب بهترین راهکار را پیچیده می‌کند (Seidler et al., ۲۰۲۳; Zou et al., ۲۰۲۰) .

مطالعات متعددی اثرات ارتعاش و صدای ناشی از حمل‌ونقل ریلی را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیطی در مجاورت سکونتگاه‌ها و محوطه‌های تاریخی شناسایی کرده‌اند. Özgür Can و Torun در یک مطالعه مروری نشان دادند که نویز غلتشی ناشی از تماس چرخ و ریل، سهم غالبی از نویز ریلی را به خود اختصاص می‌دهد و با افزایش سرعت قطار، شدت آن به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد (Can & Torun, ۲۰۲۲). نتایج این پژوهش بیانگر آن است که راهکارهای کاهنده مبتنی بر مسیر نظیر میراگر ریل، پدهای ارتجاعی و فرش زیربالاست، در صورت استفاده منفرد معمولاً کاهش محدودی در حدود ۵ تا ۸ دسی‌بل ایجاد می‌کنند و تنها در صورت به‌کارگیری ترکیبی می‌توانند عملکرد بهتری داشته باشند. با این حال، در محدوده‌های تاریخی که محدودیت‌های فضایی و حفاظتی وجود دارد، امکان اجرای هم‌زمان این راهکارها اغلب با محدودیت جدی مواجه است و کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد. در کنار راهکارهای کاهنده، پژوهش‌های مرتبط با پایش و ارزیابی ارتعاش در بناها و محوطه‌های تاریخی بر اهمیت روش‌های دقیق اندازه‌گیری و تحلیل دینامیکی تأکید دارند. Casazza و Barone با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود نشان دادند که پاسخ ارتعاشی سازه‌های تاریخی به‌شدت به ویژگی‌های مصالح، هندسه و شرایط مرزی وابسته است و جانمایی نامناسب حسگرها می‌تواند منجر به خطای قابل‌توجه در برآورد دامنه و فرکانس ارتعاش شود (Casazza & Barone, ۲۰۲٤). Karanikoloudis و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پایش یک بنای تاریخی واقع بر روی خط مترو گزارش کردند که مقادیر سرعت ارتعاش در برخی بازه‌های زمانی از حدود مجاز سرویس‌پذیری فراتر رفته و انتخاب نادرست فرکانس نمونه‌برداری (کمتر از ۱۰ برابر فرکانس غالب) باعث پدیده Aliasing و کاهش دامنه واقعی سیگنال شده است (Karanikoloudis et al., ۲۰۲۱). این نتایج نشان می‌دهد که حتی ارزیابی دقیق اثرات ارتعاشی نیز در محیط‌های تاریخی با عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی همراه است. از منظر برنامه‌ریزی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، برخی مطالعات فراتر از پایش و کاهش موضعی اثرات، بر لزوم بازنگری در تصمیمات کلان مکانی تأکید کرده‌اند. Antonson و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی گزارش‌های ارزیابی اثرات زیست‌محیطی نشان دادند که پیوستگی میراث فرهنگی در کمتر از ۳۰ درصد مطالعات لحاظ شده و اغلب به عناصر ملموس محدود مانده است (Antonson et al., ۲۰۱۰). در همین راستا، Bakkar و همکاران (۲۰۲۳) و Pirrotta و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که فرکانس‌های طبیعی بسیاری از سازه‌های تاریخی در بازه ۲ تا ۱۰ هرتز قرار دارد؛ بازه‌ای که با ارتعاشات ناشی از عبور قطار هم‌پوشانی داشته و خطر تشدید ارتعاش را افزایش می‌دهد (Bakkar et al., ۲۰۲۳; Pirrotta et al., ۲۰۲۵). مجموع این مطالعات بیانگر آن است که در محوطه‌های تاریخی حساس، راهکارهای موضعی کاهش ارتعاش و صدا همواره پاسخگوی الزامات حفاظتی نیستند و بررسی گزینه‌های کلان مهندسی نظیر اصلاح راستای مسیر، جابه‌جایی ایستگاه یا خروج خط ریلی از محدوده تاریخی، می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدارتر و مؤثرتر مطرح شود؛ موضوعی که پژوهش حاضر به‌طور مشخص به آن می‌پردازد. هدف پژوهش حاضر، ارائه یک تحلیل کاربردی است که اثرات ناشی از عبور قطارها بر محدوده تپه حصار را از منظر صدا و ارتعاش اندازه‌گیری و در برابر سطوح مجاز مرتبط ارزیابی می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک مبنای تصمیم‌گیری برای توسعه پایدار خطوط ریلی در مناطق حساس میراثی مورد استفاده قرار گیرد و نشان دهد که حفاظت از ارزش‌های تاریخی و توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل چگونه می‌توانند به‌طور همزمان مدیریت شوند.

شکل ۱. تصویری از ایستگاه راه‌آهن دامغان و منطقه تاریخی تپه حصار

۲-روش‌شناسی تحقیق

۲-۱- رویکرد کلی پژوهش و چارچوب مفهومی تحلیل

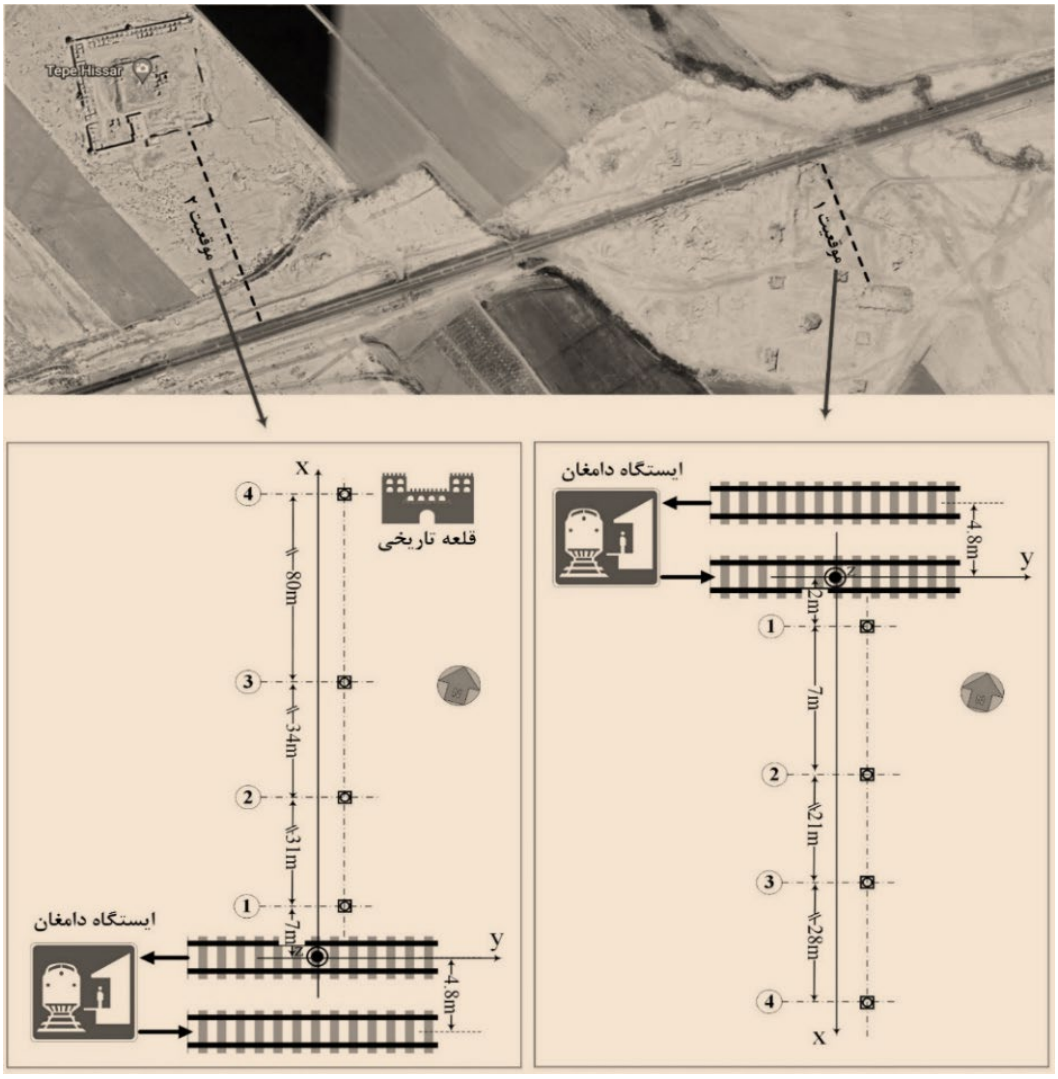
پژوهش حاضر یک مطالعه کاربردی با رویکرد تحلیلی–کمی در حوزه حمل‌ونقل ریلی و حفاظت از میراث فرهنگی است که با هدف ارزیابی اثرات فیزیکی عبور خط و ایستگاه ریلی بر محوطه تاریخی تپه حصار دامغان انجام شده است (شهرسازی و ریلی، ۱۴۰۱). روش تحقیق مبتنی بر مطالعه موردی بوده و تمرکز آن بر تحلیل کمی ارتعاشات و آلودگی صوتی ناشی از بهره‌برداری ریلی با هدف کاهش این اثرات است. چارچوب مفهومی پژوهش بر مدل «منبع–مسیر انتشار–گیرنده» استوار است که به‌طور گسترده در تحلیل اثرات ارتعاش و صدا در پروژه‌های حمل‌ونقل ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل، تولید ارتعاش و صدا در تماس چرخ–ریل و سازه خط به‌عنوان منبع، انتشار امواج در محیط زمین و هوا به‌عنوان مسیر، و دریافت اثرات توسط آثار مدفون، ابنیه تاریخی و انسان به‌عنوان گیرنده در نظر گرفته می‌شود. این چارچوب مبنای انتخاب شاخص‌های کمی، طراحی اندازه‌گیری‌های میدانی و تعریف راهکارهای کاهش اثرات در پژوهش حاضر بوده است (Seidler et al., ۲۰۲۳). فرآیند روش‌شناسی این پژوهش به‌صورت یکپارچه و مبتنی بر سنجش‌های میدانی طراحی شد. ابتدا محدوده‌های حساس در عرصه و حریم محوطه تاریخی تپه حصار دامغان شناسایی و نقاط نمونه‌برداری با توجه به فاصله از خط، شرایط توپوگرافی و کاربری محوطه تعیین گردید. سپس اندازه‌گیری‌های میدانی ارتعاش و تراز صوت ناشی از عبور قطار با استفاده از تجهیزات استاندارد انجام و داده‌ها در شرایط مختلف بهره‌برداری ثبت شد. در ادامه، نتایج اندازه‌گیری با حدود مجاز استانداردهای مرتبط مقایسه و شدت اثرات در بخش‌های مختلف محوطه تحلیل شد.

۲-۲- روش اندازه‌گیری و تحلیل کمی ارتعاشات

۲-۲-۱- طراحی ابزاربندی میدانی و نقاط اندازه‌گیری

به‌منظور ارزیابی کمی اثرات ارتعاشی، برنامه اندازه‌گیری میدانی با استفاده از سنسورهای میکروترمور طراحی شد. دو موقعیت اندازه‌گیری مستقل در داخل و پیرامون محوطه تاریخی انتخاب

گردید تا هم پاسخ لایه‌های زیرسطحی و هم رفتار ارتعاشی یک بنای تاریخی موجود مورد بررسی قرار گیرد. در هر موقعیت، چهار سنسور در فواصل مختلف از محور خط ریلی (در بازه ۵ تا ۸۰ متر) مستقر شدند. این چیدمان امکان تحلیل تضعیف ارتعاش با فاصله و تعیین فاصله‌های بحرانی را فراهم می‌کند. آرایش سنسورها و فواصل اندازه‌گیری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. موقعیت نقاط اندازه‌گیری ارتعاش نسبت به محور خط

۲-۲-۲- شاخص‌های کمی و شرایط بهره‌برداری

بر اساس روش‌شناسی پژوهش، شاخص اصلی تحلیل ارتعاش، حداکثر سرعت ذرات زمین بر حسب میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد؛ شاخصی که در اغلب استانداردهای بین‌المللی حفاظت از آثار تاریخی به‌عنوان معیار مرجع برای ارزیابی خطرات ارتعاشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور دستیابی به نتایج قابل اتکا و منطبق با شرایط واقعی بهره‌برداری، اندازه‌گیری‌های میدانی برای طیفی متنوع از قطارهای مسافری و باری و در بازه‌ای از سرعت‌های عملیاتی انجام شد. همان‌گونه که در جدول ۱ ارائه شده است، سرعت قطارها در محدوده ۳۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت قرار داشته که نمایانگر شرایط متداول بهره‌برداری در ایستگاه دامغان است. ترکیب قطارهای مورد اندازه‌گیری از نظر نوع قطار، تعداد واگن و طول قطار به‌گونه‌ای انتخاب شد که اثر این پارامترها بر دامنه ارتعاشات به‌صورت کمی قابل بررسی باشد. در موقعیت نخست، علاوه بر سه قطار مسافربری با ۵ تا ۱۰ واگن و سرعت‌های ۴۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت، یک قطار باری با ۱۱ واگن و سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت ثبت شد که امکان مقایسه مستقیم پاسخ ارتعاشی ناشی از قطارهای سبک‌تر و سنگین‌تر را فراهم کرد. در موقعیت دوم نیز ترکیبی از قطارهای مسافربری کوتاه و متوسط (۶ تا ۱۱ واگن) و قطارهای باری

بسیار سنگین، شامل یک قطار باری با ٤٤ واگن و یک قطار با چهار لکوموتیو و سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت، مورد بررسی قرار گرفت. این تنوع بهره‌برداری، شرایطی نزدیک به سناریوهای بحرانی از نظر تولید ارتعاش را شبیه‌سازی می‌کند.

جدول ۱. تعداد و نوع قطارها عبوری در هر موقعیت

موقعیت	ردیف	نوع قطار	تعداد واگن	تعداد لکوموتیو	سرعت قطار (km/h)
۱	۱	باری	۱۱	۱	٦۰
	۲	مسافربری	۱۰	۱	۷۰
	۳	مسافربری	۵	۱	۵۲
	٤	مسافربری	۱۰	۱	٤۰
۲	۱	مسافربری	٦	۱	۳۰
	۲	مسافربری	۱۱	۱	۵۰
	۳	باری	٤٤	۱	٦۰
	٤	باری	–	٤	۷۰
	۵	مسافربری	۱۰	۱	۳۰

۲-۲-۳- تحلیل دامنه و فرکانس ارتعاش

داده‌های ثبت‌شده علاوه بر تحلیل زمانی، در حوزه فرکانس نیز بررسی شدند. نتایج تحلیل فرکانسی نشان داد که بخش غالب انرژی ارتعاشی در بازه ۱۰ تا ٦۰ هرتز متمرکز است. این بازه فرکانسی از نظر تأثیرگذاری بر سازه‌های تاریخی و لایه‌های خاکی حساس تلقی می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب راهکارهای کاهش ارتعاش دارد.

۲-۲-٤-حدود مجاز ارتعاش و معیارهای ارزیابی ارتعاشات

برای ارزیابی انطباق ارتعاشات اندازه‌گیری‌شده، حدود مجاز بر اساس استانداردهای معتبر بین‌المللی استخراج شد. معیار اصلی، مقدار PPV یا حداکثر سرعت ذره (Peak Particle Velocity) پیشنهادی در آیین‌نامه‌هایی نظیر ISO 4866، DIN 4150، NCHRP و دستورالعمل FTA است (Miller et. Al. 2024).

با توجه به جنس مصالح (خشت) و اهمیت حفاظتی آثار تپه حصار، دو سطح معیار در تحلیل‌ها لحاظ شد:

PPV = 2 mm/s به‌عنوان حد مجاز متعارف برای بناهای تاریخی،

PPV = 0/2 mm/s به‌عنوان حد سخت‌گیرانه حفاظتی.

علاوه بر این، معیار آزاردهندگی انسان نیز بر اساس دستورالعمل FTAدر نظر گرفته شد.

۲-۳- روش اندازه‌گیری و تحلیل کمی آلودگی صوتی

آلودگی صوتی، در کنار ارتعاش، یکی از مهم‌ترین پیامدهای توسعه و بهره‌برداری از خطوط ریلی به‌شمار می‌رود که می‌تواند آثار نامطلوبی بر آسایش انسان، کیفیت محیطی و پایداری سازه‌های مجاور، به‌ویژه ابنیه تاریخی، بر جای گذارد (Can & Torun, ۲۰۲۲). در مناطق دارای ارزش میراثی، نظیر محوطه تاریخی تپه حصار دامغان، اهمیت ارزیابی دقیق و کمی صدای ریلی دوچندان می‌شود؛ چراکه صدای مزمن و تکرارشونده ناشی از عبور قطارها، علاوه بر ایجاد آزردگی صوتی، می‌تواند در بلندمدت بر ادراک منظر فرهنگی و کیفیت تجربه بازدیدکنندگان اثر منفی بگذارد. ازاین‌رو، در این پژوهش، روش اندازه‌گیری و تحلیل آلودگی صوتی با تمرکز بر صدای هوابرد ناشی از عبور قطارها و در انطباق با استانداردهای معتبر ملی و بین‌المللی تدوین شده است.

۲-۳-۱-مبانی استانداردی و شاخص ارزیابی صدا

مبنای ارزیابی آلودگی صوتی در این مطالعه، صدای هوابرد منتقل‌شده از طریق هوا است که دارای چارچوب‌های استاندارد

مدون در سطح ملی و بین‌المللی می‌باشد. مرور استانداردهای بین‌المللی نشان می‌دهد که حدود مجاز تراز فشار صوت بسته به نوع کاربری اراضی، بازه زمانی (روز و شب) و سیاست‌های توسعه‌ای کشورها متفاوت است. در این راستا، استانداردهای فدرال آمریکا، آلمان، ژاپن به‌عنوان مراجع اصلی مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی تطبیقی این استانداردها نشان می‌دهد که برای کاربری‌های مسکونی و محیط‌های حساس، حدود مجاز تراز فشار صوت عموماً در بازه‌ای در حدود ٤٥ تا ٧٠ دسی‌بل تعریف می‌شود که مبنای مقایسه در این پژوهش قرار گرفته است. در سطح ملی، ضوابط آلودگی صوتی کشور ایران، که توسط مراجع ذی‌صلاح محیط‌زیست تدوین شده‌اند، به‌عنوان معیار اصلی مقایسه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. مطابق جدول ۲، در ایران، حد مجاز تراز متوسط صدا در مناطق مسکونی برابر با ٥٥ دسی‌بل در دوره روز و ٤٥ دسی‌بل در دوره شب تعیین شده است که با استناد به استانداردهای بین‌المللی مد نظر قرار گرفته است (DOE، ٢٠١٤ و ISO1996-1، ٢٠١٧). با توجه به ماهیت تاریخی و حساسیت عملکردی منطقه تپه حصار، این حدود به‌عنوان معیار محافظه‌کارانه ارزیابی انتخاب شدند.

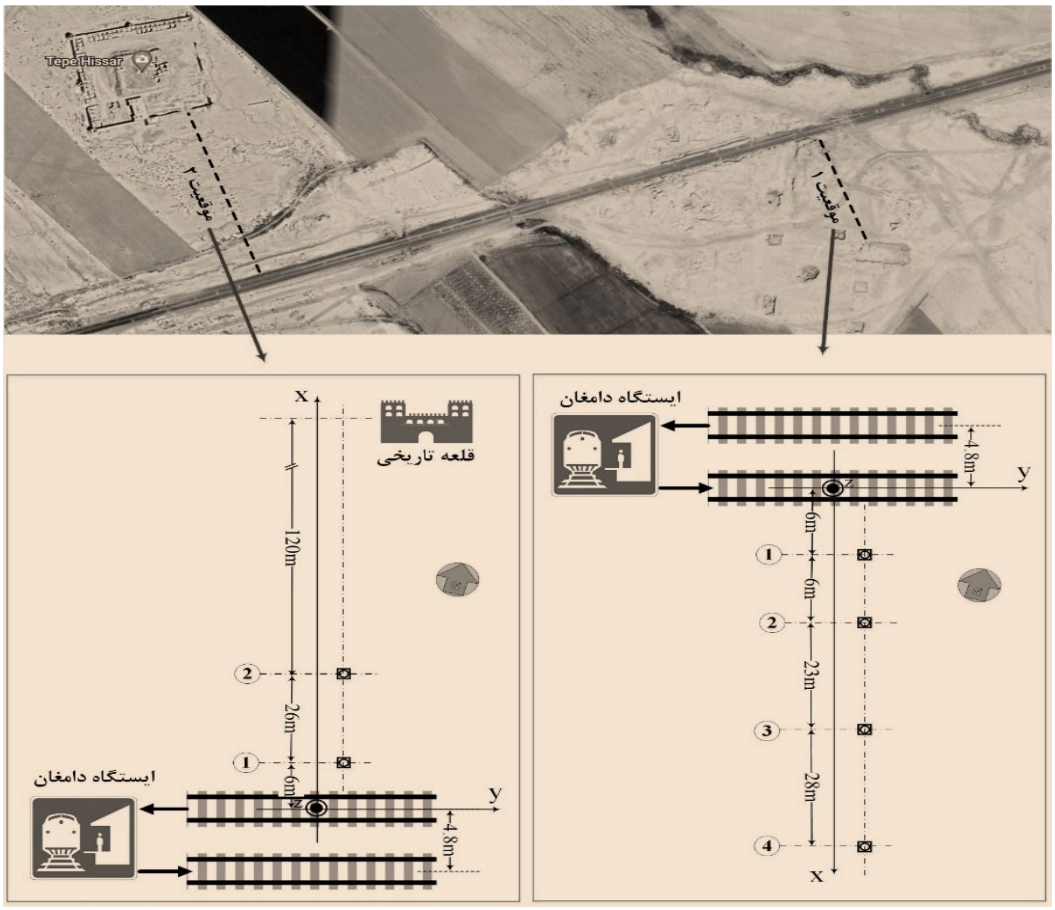
شاخص کمی مورد استفاده برای تحلیل آلودگی صوتی، تراز فشار صوت معادل (L_{eq}) است که به‌طور گسترده در مطالعات صداسنجی محیطی و ارزیابی اثرات حمل‌ونقل ریلی به‌کار می‌رود. این شاخص بیانگر انرژی متوسط صوت در یک بازه زمانی مشخص بوده و امکان مقایسه مستقیم با حدود مجاز استانداردی را فراهم می‌سازد. انتخاب L_{eq} همچنین این مزیت را دارد که امکان تحلیل هم‌زمان با شاخص PPV در نقاط یکسان را فراهم می‌کند و بدین ترتیب، ارزیابی جامع‌تری از اثرات فیزیکی عبور قطار حاصل می‌شود.

جدول ۲. حد مجاز آلودگی صوتی در ایران

نوع منطقه	تراز متوسط روز (۷ صبح تا ۱۰ شب)	تراز متوسط شب (۱۰ شب تا ۷ صبح)
مسکونی	٥٥	٤٥
مختلط (تجاری–مسکونی)	٦٥	٥٥
تجاری–اداری	٦٥	٥٥
فعالیت (مسکونی–صنعتی)	٧٠	٦٠
صنعتی	٧٥	٦٥

۲-۳-۲- طراحی اندازه‌گیری‌های میدانی و ابزاربندی

اندازه‌گیری‌های میدانی صدا در دو موقعیت منتخب در محدوده تاریخی تپه حصار انجام شد که پیش‌تر نیز در فصل ارتعاش معرفی شده بودند. موقعیت اول در مجاورت خط ریلی و نزدیک به برجستگی‌های اصلی تپه تاریخی قرار دارد و نمایانگر بدترین شرایط مواجهه صوتی در نزدیکی منبع است. موقعیت دوم در مجاورت قلعه تاریخی واقع در شمال‌غرب محوطه انتخاب شد که از نظر فاصله و شرایط انتشار، نمایانگر وضعیت دریافت‌کننده حساس محسوب می‌شود. چیدمان نقاط اندازه‌گیری، فواصل از محور خط و محل استقرار سنسورها در شکل ۳ نشان داده شده است برای ثبت تراز صدا، از دستگاه صداسنج BZ7223 Version 2.0.1 استفاده شد که قابلیت اندازه‌گیری در بازه فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را داراست. دستگاه پیش از انجام آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ISO 2041 کالیبره شد تا دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها تضمین شود. اندازه‌گیری‌ها در ساعات مختلف روز و در شرایط واقعی بهره‌برداری خط انجام گرفت تا تأثیر تغییرات ترافیک ریلی و شرایط محیطی لحاظ شود (۱۰–۲۰۱۸, ۲۰۱۸).



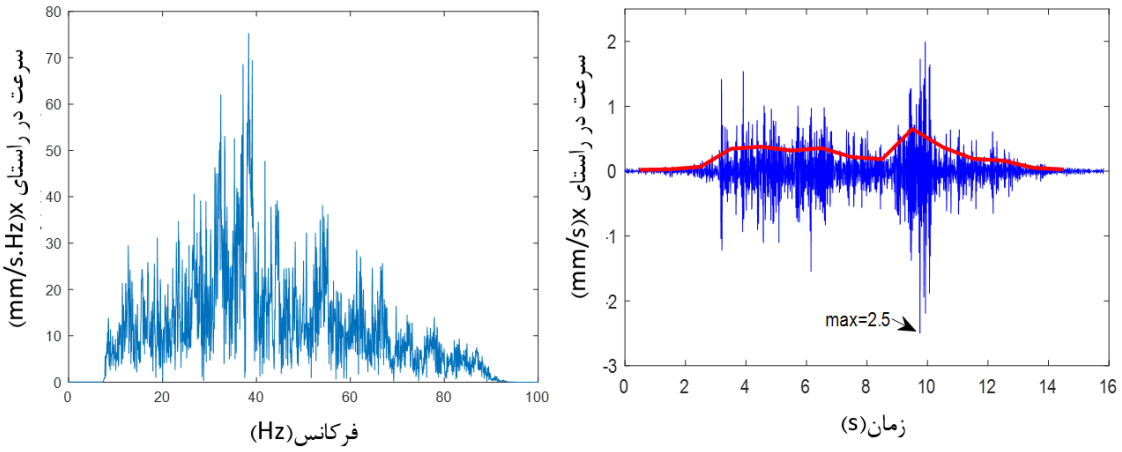
شکل ۳. چیدمان سنسورها در دو موقعیت مختلف ثبت صدا

۲-۳-۳- مشخصات قطارها و سناریوهای اندازه‌گیری

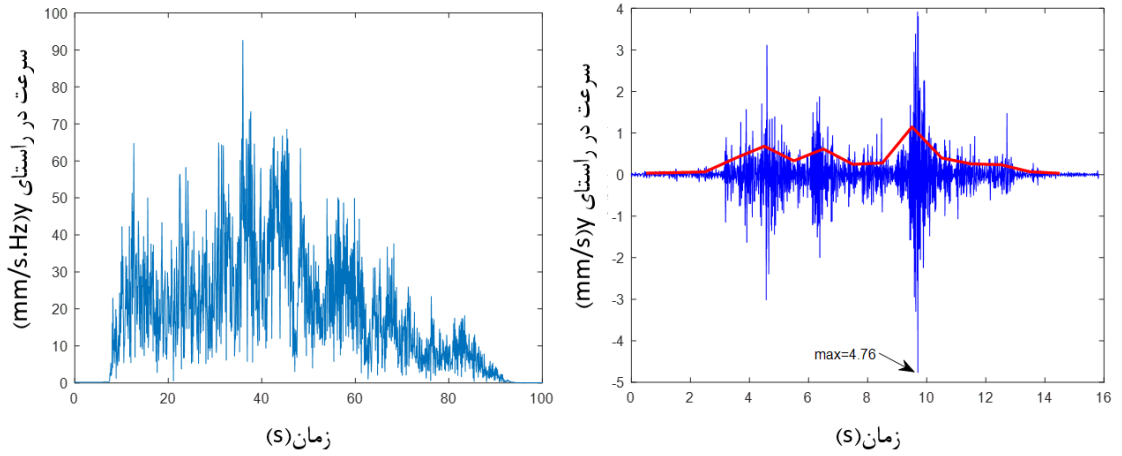
به‌منظور پوشش دامنه متنوعی از شرایط بهره‌برداری، اندازه‌گیری‌ها برای قطارهای مسافربری و باری با ترکیب‌های مختلف انجام شد. مشخصات قطارهای عبوری شامل نوع قطار، تعداد واگن، تعداد لکوموتیو و سرعت حرکت در جدول ۳ خلاصه شده است. در موقعیت اول، عبور چهار قطار مسافربری با تعداد واگن بین ۵ تا ۱۰ و سرعت‌هایی در بازه ۳۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت ثبت شد. در موقعیت دوم، علاوه بر قطارهای مسافربری، یک قطار باری سنگین با ٤٤ واگن و سرعت ٦٠ کیلومتر بر ساعت نیز مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. این تنوع، امکان بررسی اثر پارامترهای عملیاتی قطار بر تراز صدای هوابرد و شناسایی شرایط بحرانی صوتی را فراهم ساخت.

جدول ۳. تعداد و نوع قطارها عبوری در هر موقعیت

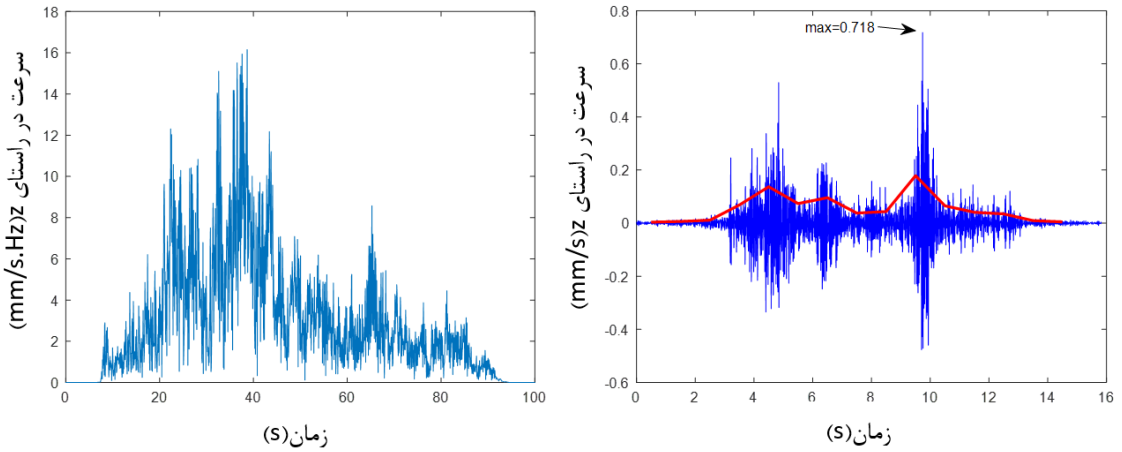
موقعیت	ردیف	نوع قطار	تعداد واگن	تعداد لکوموتیو	سرعت قطار (کیلومتر بر ساعت)
۱	۱	مسافربری	۱۰	۱	۷۰
	۲	مسافربری	۵	۱	۵۲
	۳	مسافربری	۱۰	۱	٤٠
	٤	مسافربری	٦	۱	۳۰
۲	۱	باری	٤٤	۱	٦٠
	۲	مسافربری	۱۱	۱	۵۰
	۳	مسافربری	۱۰	۱	۳۰



الف) ارتعاشات در راستای عمود بر خط



ب) ارتعاشات در راستای خط



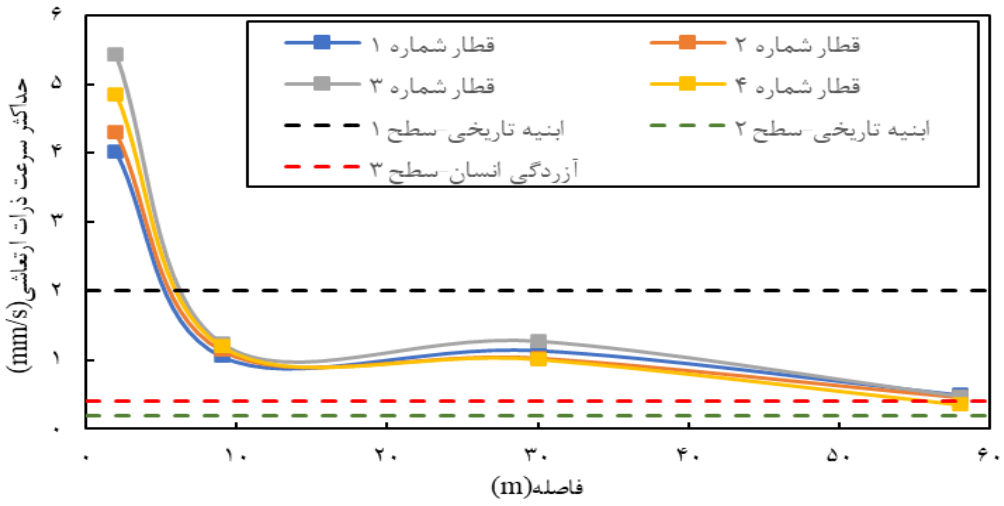
ج) ارتعاشات در راستای قائم

شکل ٤. ارتعاشات در حوزه زمان و فرکانس برای قطار مسافری شماره ۳ در ایستگاه ۱ در موقعیت ۱. خط قرمز RMS۱ ثانیه است.

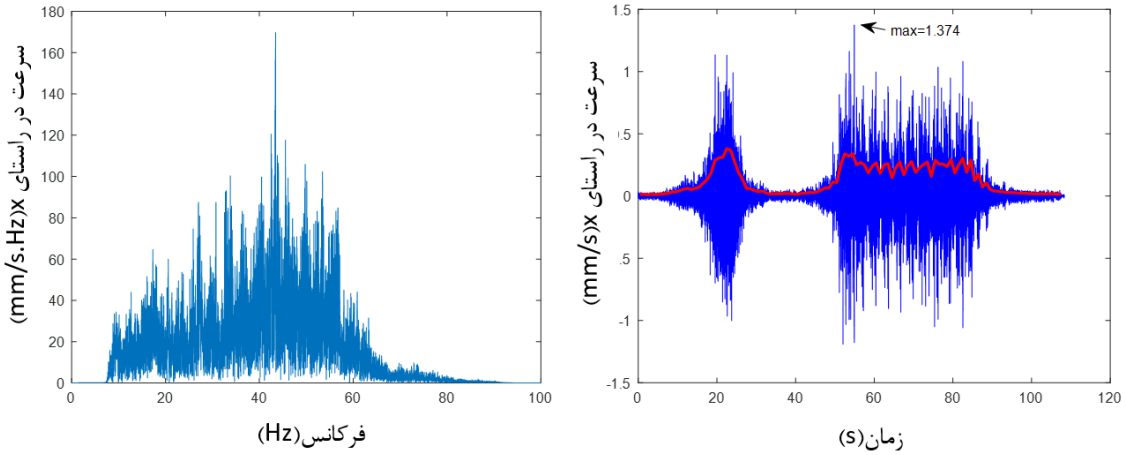
۳- نتایج و تحلیل

۳-۱- نتایج و تحلیل اثرات ارتعاش

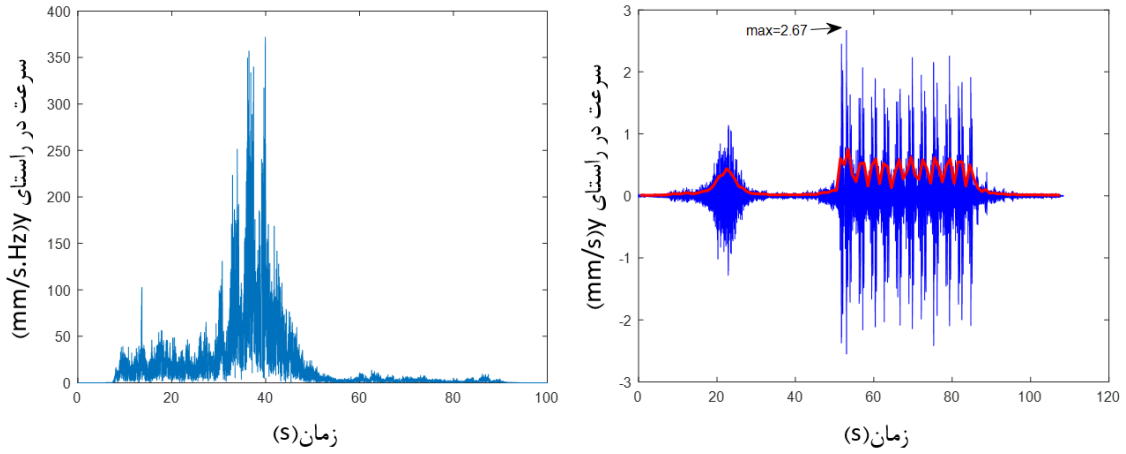
نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد که عبور قطارهای مسافربری و باری در محدوده مورد مطالعه، منجر به ایجاد ارتعاشات محسوس در زمین می‌شود. دامنه این اثرات تابعی از نوع قطار، سرعت حرکت، تعداد واگن‌ها، فاصله از محور خط و شرایط بهره‌برداری هم‌زمان مسیر است. نتایج ثبت‌شده PPV در دو موقعیت اندازه‌گیری‌شده نشان می‌دهد که مقادیر ارتعاش در فواصل نزدیک به خط ریلی به‌طور محسوسی بالا بوده و با افزایش فاصله از محور خط، روند کاهشی منظم و قابل‌تحلیلی را دنبال می‌کنند. در موقعیت ۱، بیشترین مقادیر PPV عمدتاً در اثر عبور قطارهای مسافربری با سرعت‌های بالاتر ثبت شده است. بررسی مؤلفه‌های ارتعاشی در راستاهای قائم، موازی و عمود بر خط ریلی نشان می‌دهد که دامنه ارتعاشات در این راستاها تفاوت معناداری با یکدیگر دارد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین ارتعاشات در راستای موازی با خط و کمترین آن‌ها در راستای قائم مشاهده شده است. این الگوی رفتاری به‌عنوان نمونه در شکل ٤ ارائه شده است. بررسی PPV برحسب فاصله از محور خط ریلی نشان می‌دهد که در راستای عمود بر خط، مقدار ارتعاش در فواصل نزدیک به خط به‌سرعت کاهش یافته و در فاصله‌ای حدود ۵ متر به کمتر از ۲ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد؛ با این حال، در فواصل دورتر همچنان از حد سخت‌گیرانه حفاظتی آثار تاریخی فراتر باقی می‌ماند. در راستای موازی با خط، روند تضعیف ارتعاشات کندتر بوده و حتی در فواصل بیش از ۵۰ متر نیز مقادیر قابل‌توجهی ثبت شده است. ارتعاشات قائم در تمامی فواصل نسبت به دو راستای دیگر کمتر بوده و از فاصله‌ای حدود ۳۰ متر به بعد به سطوح پایین‌تری کاهش می‌یابد. ارتعاش کل ناشی از ترکیب سه مؤلفه ارتعاشی که در شکل ۵ ارائه شده است، نشان می‌دهد که مقدار PPV ترکیبی در فاصله‌ای حدود ۷ متر از محور خط به کمتر از ۲ میلی‌متر بر ثانیه می‌رسد، اما دستیابی به سطح کمتر از ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه نیازمند فاصله‌ای بیش از ٦۰ متر است. این الگو بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از عرصه و حریم محوطه تاریخی در معرض ارتعاشاتی فراتر از حدود سخت‌گیرانه حفاظتی قرار دارد. در موقعیت ۲، که شامل عبور هم‌زمان قطارهای باری و مسافربری در جهت‌های مخالف است، دامنه ارتعاشات ثبت‌شده افزایش محسوسی نسبت به موقعیت ۱ نشان می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری‌ها بیانگر آن است که بیشترین مقادیر PPV در فواصل نزدیک به خط ریلی و عمدتاً در راستای موازی با مسیر ثبت شده‌اند. بررسی تغییرات PPV برحسب فاصله از محور خط، نمونه‌ای از این رفتار را در شکل ٦ نشان می‌دهد که حاکی از روند کاهشی ارتعاشات با افزایش فاصله، اما با شیبی ملایم‌تر نسبت به موقعیت ۱ است. بر این اساس، دستیابی به مقادیر کمتر از حد سخت‌گیرانه حفاظتی ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه در راستای موازی با خط، مستلزم فاصله‌ای در حدود ۸۰ متر از محور خط ریلی است.



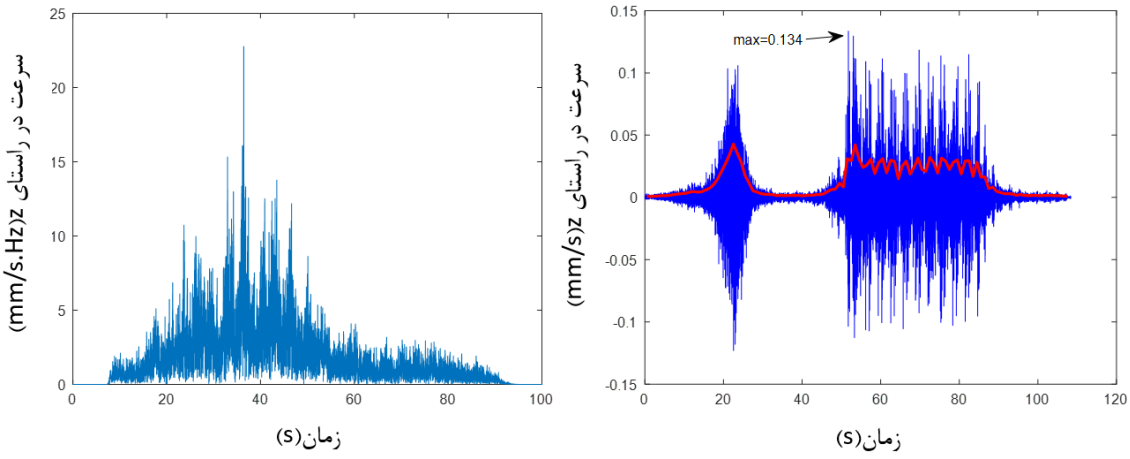
شکل ۵. مقادیر ارتعاشات کل نسبت به فاصله از مرکز خط در موقعیت ۱



الف) ارتعاشات در راستای عمود بر خط



ب) ارتعاشات در راستای خط

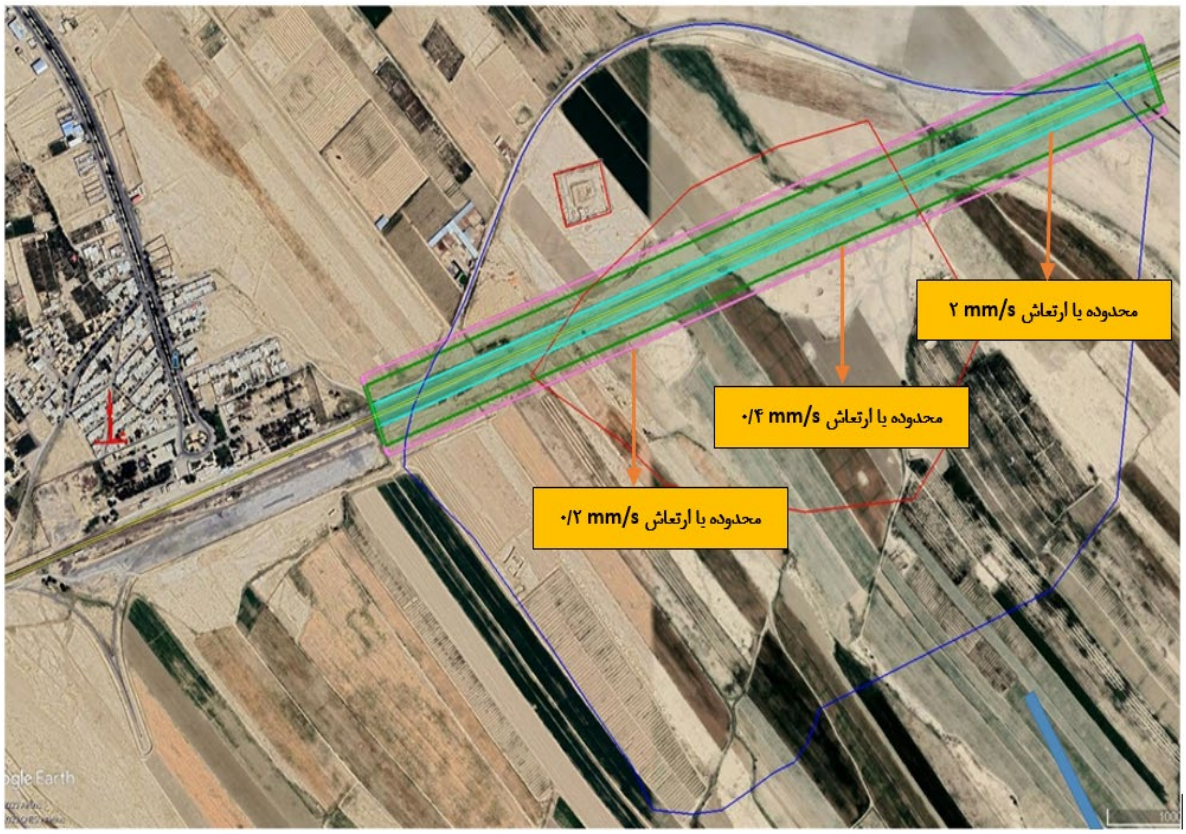


ج) ارتعاشات در راستای قائم

شکل ٦. ارتعاشات در حوزه زمان و فرکانس برای قطارهای شماره ٤ و ٥ در ایستگاه ۱ موقعیت ۲. خط قرمز RMS۱ ثانیه است.

ارتعاش کل در موقعیت ۲ نشان می‌دهد که مقدار PPV ترکیبی در فاصله‌ای حدود ۲۰ متر از محور خط ریلی به کمتر از (میلی متر بر ثانیه) کاهش می‌یابد، با این حال برای رعایت هم‌زمان معیارهای سخت‌گیرانه حفاظتی آثار تاریخی و حدود عدم آزردگی انسان، فاصله‌ای در بازه ۵۰ تا ۸۰ متر ضروری است.

پهنه‌بندی نواحی تحت تأثیر ارتعاشات غیرمجاز که در شکل ۷ ارائه شده است، بیانگر آن است که بخش‌هایی از عرصه محوطه تاریخی، به‌ویژه نواحی دارای بقایای سطحی، در محدوده ارتعاشات نامطلوب قرار دارند.



شکل ۷. شمایی از محدوده‌های با سطوح ارتعاشات غیرمجاز

٤- نتایج و تحلیل اثرات صوتی

در بخش آلودگی صوتی، نتایج اندازه‌گیری تراز صدای هوابرد نشان می‌دهد که عبور قطارها منبع اصلی افزایش تراز فشار صوت در محدوده مورد مطالعه است. در موقعیت ۱، مقادیر تراز صدای معادل وزنی (L_{Aeq}) در فواصل مختلف از محور خط، مطابق جدول ٤، نشان می‌دهد که مقدار L_{Aeq} در نزدیک‌ترین فاصله به خط به حدود ۸۹ dB می‌رسد و با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. در فاصله ٦٣ متری، مقدار L_{Aeq} در حدود ٦٦ dB ثبت شده است. مقادیر بیشینه لحظه‌ای صدا (L_{Apeak}) نیز در فواصل نزدیک به خط به بیش از ۱۱۵ dB رسیده است.

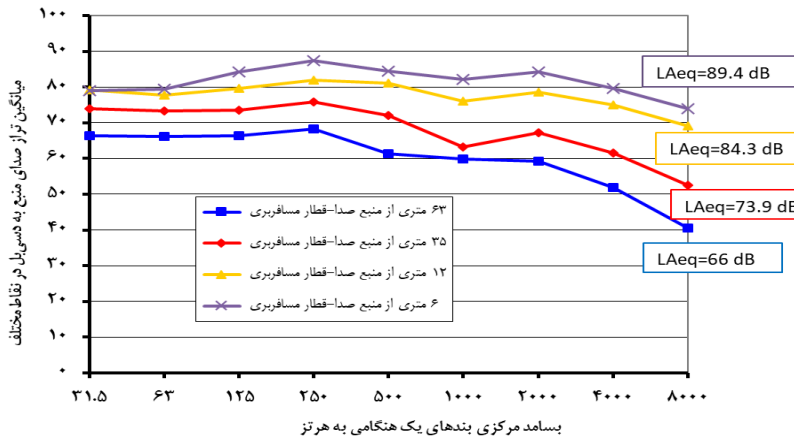
در موقعیت ۲، نتایج ارائه‌شده در جدول ۵ نشان می‌دهد که تراز صدای قطارهای باری به‌طور کلی بالاتر از قطارهای مسافربری است. در فاصله ٦ متری از خط، مقدار L_{Aeq} برای قطار باری حدود ۸۷ dB و برای قطار مسافربری حدود ۷۵ dB ثبت شده است. با افزایش فاصله تا حدود ۳۲ متر، تراز صدای قطار مسافربری به حدود ٦٤ dB کاهش یافته است. نمونه بررسی طیف فرکانسی صدا که در شکل ۸ برای موقعیت ۱ ارائه شده است، نشان می‌دهد که بیشترین انرژی صوتی در باندهای فرکانسی میانی متمرکز است.

جدول ٤. نتایج اندازه‌گیری تراز صدای هوابرد منبع صدا در موقعیت ۱

میانگین تراز صدا در شبکه وزنی (L_{Aeq}) بر حسب دسی‌بل	قطار مسافربری- فاصله ٦ متری	۸۹/٤
	قطار مسافربری- فاصله ۱۲ متری	۸٤/۳
	قطار مسافربری- فاصله ۳۵متری	۷۳/۹
	قطار مسافربری- فاصله ٦۳ متری	٦٦
پیک تراز فشار صدا در شبکه وزنی (L_{Apeak}) بر حسب دسی‌بل	قطار مسافربری- فاصله ٦ متری	۱۱۵/۸
	قطار مسافربری- فاصله ۱۲ متری	۱۱۱/٦
	قطار مسافربری- فاصله ۳۵متری	۱۰۰/٤
	قطار مسافربری- فاصله ٦۳ متری	۹٤/۱
میانگین تراز صدا بدون شبکه وزنی (L_{zeq}) بر حسب دسی‌بل	قطار مسافربری- فاصله ٦ متری	۹۲/٦
	قطار مسافربری- فاصله ۱۲ متری	۸۸/٤
	قطار مسافربری- فاصله ۳۵متری	۸۱/٤
	قطار مسافربری- فاصله ٦۳ متری	۷٤/۰

جدول ۵. نتایج اندازه‌گیری تراز صدای هوابرد منبع صدا در موقعیت ۲

میانگین تراز صدا در شبکه وزنی (L_{Aeq}) بر حسب دسی‌بل	قطار باری- فاصله ٦ متری	۸۷/۰
	قطار مسافربری- فاصله ٦ متری	۷۵/۱
	قطار مسافربری- فاصله ۳۲ متری	٦۳/۸
پیک تراز فشار صدا در شبکه وزنی (L_{Apeak}) بر حسب دسی‌بل	قطار باری- فاصله ٦ متری	۱۱۵/۸
	قطار مسافربری- فاصله ٦ متری	۱۰۰/۹
	قطار مسافربری- فاصله ۳۲ متری	۸۲/۳
میانگین تراز صدا بدون شبکه وزنی (L_{zeq}) بر حسب دسی‌بل	قطار باری- فاصله ٦ متری	۹۱/۳
	قطار مسافربری- فاصله ٦ متری	۸۳/۵
	قطار مسافربری- فاصله ۳۲ متری	۷۸/۹



شکل ۸. تراز صدای هوابرد منبع صدا در فواصل مختلف از خط در فرکانس‌های مختلف

تحلیل نتایج بیانگر آن است که تراز صدای هوابرد ناشی از عبور قطارها در فواصل نزدیک به خط، به‌طور معناداری بالاتر از حدود قابل قبول برای فضاهای تاریخی و بازدیدپذیر است. هرچند کاهش تراز صدا با افزایش فاصله از خط مشاهده می‌شود، اما این کاهش به‌گونه‌ای است که حتی در فواصل ۳۰ تا ۴۰ متری نیز در برخی سناریوها، تراز صدا در آستانه حدود مجاز باقی می‌ماند. نتایج نشان می‌دهد که قطارهای باری سهم بیشتری در ایجاد شرایط بحرانی صوتی دارند و فاصله ایمن صوتی برای آن‌ها بزرگ‌تر از قطارهای مسافربری است. مقایسه مقادیر ثبت‌شده نشان می‌دهد که توان صوتی قطار باری به‌طور متوسط حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بیشتر از قطار مسافربری است. همچنین تمرکز انرژی صوتی در باندهای فرکانسی میانی باعث می‌شود که صدا به‌راحتی در محیط باز منتشر شده و اثرات ادراکی آن برای بازدیدکنندگان تشدید شود.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استقرار ایستگاه دامغان و عبور خط ریلی در محدوده حریم و عرصه محوطه تاریخی تپه حصار دامغان از منظر فنی، بهره‌برداری و حفاظت از میراث فرهنگی، وضعیت مناسبی نداشته و نیازمند مداخله اساسی است. مطالعات میدانی ارتعاشات نشان داد که سطوح ارتعاش در فاصله کمتر از ۲۰ متر از محور خط، از حدود مجاز مربوط به ابنیه تاریخی فراتر بوده و حتی در فواصل ٦۰ تا ۸۰ متری نیز در برخی سطوح به محدوده‌های بحرانی نزدیک می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از عرصه محوطه تاریخی، به‌ویژه بخش‌هایی که بقایای آن در سطح زمین قابل مشاهده است، به‌طور مستقیم تحت تأثیر ارتعاشات غیرمجاز ناشی از عبور قطار قرار دارد. در حوزه آلودگی صوتی نیز نتایج نشان داد که تراز صدای ناشی از عبور قطارهای مسافری و باری تا فاصله حدود ٦۵ متر از محور خط ریلی بیش از حدود مجاز آیین‌نامه‌ای است و قطارهای باری به‌طور متوسط توان صوتی بالاتری نسبت به قطارهای مسافری ایجاد می‌کنند. برآیند نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اتکای صرف به راهکارهای موضعی کاهش ارتعاش و صدا، علی‌رغم هزینه‌بر بودن، قادر به رفع کامل مشکلات موجود نبوده و در بلندمدت نیز پایداری لازم را ندارد. ازاین‌رو، نتایج مطالعه بر ضرورت مداخله ساختاری در نحوه استقرار زیرساخت ریلی در مجاورت محوطه‌های تاریخی و توجه همزمان به الزامات بهره‌برداری حمل‌ونقل و حفاظت میراث فرهنگی تأکید می‌کند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان چارچوبی کاربردی در ارزیابی اثرات عبور خطوط ریلی از محدوده‌های تاریخی و حساس مورد استفاده قرار گیرد.

٦- سپاسگزاری

از همکاران محترم بخش حمل و نقل ریلی (آقای مهندس کلانتر نیستانکی) و بخش آکوستیک (خانم دکتر امینی نسب) در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی که در انجام مطالعات و برداشت های میدانی همکاری موثری را ارائه نمودند، کمال قدردانی را دارد. همچنین از همکاری موثر اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری استان سمنان به‌ویژه آقایان مهندس رستگاران و مهندس یغماییان کمال تشکر و سپاس را دارد.

۷- مراجع

-فتحعلی، مسعود (۱۴۰۱). مطالعات امکان‌سنجی روش‌های اصلاح اثرات عبور خط ریلی از محدوده تاریخی تپه حصار دامغان: *گزارش تحقیقاتی. تهران، ایران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.*

-Anisi, A. (2021). Tepe Hissar in Damghan: A conservation and management plan. *Conservation and Management of Archaeological Sites,* 23(3–4), 172–194.

-Antonson, H., Gustafsson, M., & Angelstam, P. (2010). Cultural heritage connectivity: A tool for EIA in transportation infrastructure planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 15(8), 463–472.

-Bakkar, A. R., Elyamani, A., El-Attar, A. G., Bompa, D. V., Elghazouli, A. Y., & Mourad, S. A. (2023). Dynamic characterisation of a heritage structure with limited accessibility using ambient vibrations. *Buildings,* 13(1), 192.

to buildings from construction vibration and its implications in Australia. Acoustics Australia, 52(2), 279–288.

-Moradi, N., Fazeli Nashli, H., & Yousefi Zoshk, R. (2024). Tepe Hissar in the fourth millennium BCE. *Journal of Archaeology and Archaeometry,* 11(3), 49.

-National Cooperative Highway Research Program. (2012). Current practices to address construction vibration and potential effects to historic buildings adjacent to transportation projects (NCHRP Project 25–25 Task 72 Report).

-Pirrotta, C., Gueli, A. M., Trigona, C., & Imposa, S. (2025). Coherence analysis for vibration monitoring under high variability conditions: Constraints for cultural heritage preventive conservation. *Journal of Sensor and Actuator Networks,* 14(2), 45.

-Sarlak, B., & Aghajani, H. (2017). Archaeological investigations at Tepe Hissar-Damghan using gravity and magnetics methods. *Journal of Research on Archaeometry,* 2(2), 19–34.

-Seidler, A., Schubert, M., Mehrjerdian, Y., Krapf, K., Popp, C., van Kamp, I., Ögren, M., & Hegewald, J. (2023). Health effects of railway-induced vibration combined with railway noise: A systematic review with exposure-effect curves. *Environmental Research,* 233, 116480.

-Sun, X., Ma, M., Jiang, B., & Cao, R. (2022). Ground vibration from freight railway: Environmental impact and potential mitigation measure at propagation path. *Environmental Science and Pollution Research,* 29(29), 44364–44377.

-Thompson, D. (2008). Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control. *Elsevier.*

-Thornton, C. P. (2009). The Chalcolithic and Early Bronze Age metallurgy of Tepe Hissar, Northeast Iran: A challenge to the “Levantine paradigm” [Doctoral dissertation, University of Pennsylvania].

-Can, Ö., & Torun, A. R. (2022). Review of railway rolling noise and ground vibration and track-related mitigation measures: Recent developments. Artıbilim: *Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 33–50.

-Casazza, M., & Barone, F. (2024). Cultural heritage structures and infrastructures vibration monitoring: Vibration sensors metrological characteristics identification through finite elements modelling and simulation. *Acta IMEKO,* 13(2), 1–9.

-Csortos, G. (2023). The noise and vibration effects and reduction methods of railway track elements [Master’s thesis, Budapest University of Technology and Economics].

-Deutsches Institut für Normung. (2016). DIN 4150-3: Structural vibration—Part 3: Effects of vibration on structures. Berlin, Germany: DIN.

-Federal Transit Administration FTA (2006). Transit noise and vibration impact assessment. U.S. Department of Transportation.

Hanson, C. E., Ross, J. C., Towers, D. A., & Harris, M. (2012). High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment.

-International Organization for Standardization. (2010). ISO 4866: Mechanical vibration and shock—Vibration of buildings—Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings (ISO 4866).

-International Organization for Standardization. (2017). ISO 1996-2: Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise- Part 2: Determination of environmental noise levels (ISO 1996-2).

-Karanikoloudis, G., Lourenço, P. B., Mendes, N., Serra, J. B., & Boroschek, R. (2021). Monitoring of induced groundborne vibrations in cultural heritage buildings: Miscellaneous errors and aliasing through integration and filtering. *International Journal of Architectural Heritage,* 15(1), 205–228.

-Miller, A., Duschlbauer, D., & Spagnol, J. (2024). The increasing application of DIN 4150-3 for the assessment of potential damage

-U.S. Department of Energy DOE. (2014). Noise pollution and vibration standards. Washington, DC: DOE.

-Vogiatzis, K. E., & Kouroussis, G. (2017). Environmental ground-borne noise and vibration from urban light rail transportation during construction and operation. *Current Pollution Reports,* 3(2), 162–173.

-Wei, J., Wang, W., & Wu, J. (2022). Numerical investigation of inside peak particle velocities for predicting the vibration influence radius of vibratory pile driving. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 153, 107103.

-Zou, C., Wang, Y., & Tao, Z. (2020). Train-induced building vibration and radiated noise by considering soil properties. *Sustainability,* 12(3), 937.

Assessment of Noise and Vibration Induced by Train Passage in the Historic Area of Tepe Hesar, Damghan

Masoud Fathali, *Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

Mohammad Mohsen Kabiri Nasrabad, Research Assistant, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: m.fathali@bhrc.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

The passage of railway lines near historical sites can, through the generation of vibration and noise pollution, produce undesirable effects on the structural stability and conservation values of these areas. Damghan Station, located on the heavily trafficked Tehran–Mashhad corridor, lies adjacent to the core area and buffer zone of the historical site of Tepe Hisar in Damghan, and the continuous movement of rail fleets within this zone has created concerns from the perspectives of cultural heritage protection and railway operation management. The aim of this research is to evaluate the level of noise and vibration generated by train passage in this area and to compare the results with the permissible limits of relevant standards. To this end, field studies involving measurements of vibration and sound were conducted at different points across the site, and the results were analyzed using standard criteria. The findings showed that in parts of the historical area, vibration and noise levels exceed allowable limits. Accordingly, the results of the study indicate that the continued operation of railways in proximity to historical sites requires special attention to monitoring, controlling physical impacts, and adopting appropriate management strategies to ensure the sustainable protection of these sites.

Keywords: Tepe Hesar, Rail Transportation, Vibration, Sound, Historical Sites