

امکان سنجی افزایش سرعت و بار محوری قطار در پل‌های راه آهن

مقاله علمی - پژوهشی

سید دانیال موسوی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

جبار علی ذاکری*، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید جواد میرمحمد صادقی، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

میثم جهانگیری، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Zakeri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۱۲-۱

چکیده

از زمان پیدایش و ایجاد راه آهن همواره افزایش سرعت و بار محوری قطار یکی از مهمترین موضوعات مد نظر برای مهندسی راه آهن بوده و در این راستا تلاش‌های متمادی و مختلفی در شبکه‌های ریلی اغلب نقاط جهان صورت گرفته است. با افزایش میزان بار محوری قطار و همچنین سرعت سیر آن مقبولیت این شیوه حمل و نقل می‌تواند بیشتر گردد. احداث خطوط و سازه‌های جدید با هدف افزایش سرعت و بار محوری قطار نیازمند صرف هزینه بالایی است، لذا بررسی امکان افزایش سرعت و بار محوری قطار در پل‌های موجود هدف این مطالعه است. با توجه به فراوانی پل از نوع با عرشه دال بتنی در بین انواع مختلف پل‌های شبکه ریلی ایران، این نوع پل در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است. در ابتدا مدل المان محدود سه بعدی از پل و قطار با در نظر گیری اندرکنش خط و قطار ایجاد گردیده و بر اساس نتایج حاصل از تست میدانی معتبر اعتبارسنجی می‌گردد. در ادامه تاثیر افزایش سرعت و بار محوری قطار بر نتایج جابجایی قائم و شتاب قائم پل مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش سرعت و بار محوری، پاسخ‌های بیشینه عرشه پل افزایشی بوده، اما عملکرد عرشه پل (جابجایی قائم و شتاب قائم) از منظر استانداردهای آیین‌نامه‌ای با یکدیگر متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: سرعت قطار، افزایش بار محوری، اندرکنش خط و قطار، پل راه آهن، مدل المان محدود

۱- مقدمه

فنی است به نحوی که حتی بتوان شرایط پل را در زمانی کوتاه ارتقاء داد. بر اساس آخرین آمار منتشر شده توسط اداره خط و سازه‌های فنی شرکت راه آهن ایران تا پایان سال ۱۳۹۷ تعداد پل‌های شبکه ریلی ۲۸۹۸۴ عدد و طول کلی آنها ۳۰۳۸۰۴ متر بوده است. با توجه به آمار مذکور و با مقایسه فراوانی انواع پل‌های راه آهن موجود در شبکه ریلی، پل راه آهن با عرشه دال بتنی با فراوانی ۱۲۰۵۶ عدد در حدود ۵۷ درصد از کل آمار را به خود اختصاص داده و بیشترین فراوانی را در بین سایر انواع سیستم‌های سازه‌ای پل‌ها دارا است که با مشخصات ابعادی و همچنین تعداد دهانه‌های مختلف در سرتاسر خطوط ریلی گسترده شده‌اند. در جداول ۱ و ۲ فراوانی این نوع از

از اصلی‌ترین و مهم‌ترین عوامل افزایش ظرفیت هر شیوه حمل و نقلی، بیشینه مقدار مجاز بار محوری آن است که تاثیر زیادی در مقدار ظرفیت مسافر و یا بار دارد. در این راستا یکی از اصلی‌ترین و پرچالش‌ترین بخش‌های مسیر، سازه‌های موجود در مسیر خطوط راه آهن و مخصوصاً پل‌ها هستند که هیچ‌گونه نقصی در عملکرد آن‌ها قابل پذیرش نبوده و بروز هر گونه مشکلی در آنها می‌تواند منجر به انسداد کامل مسیر برای مدت طولانی گردد. با توجه به تحت سرویس بودن خطوط و همچنین پل‌های قرار گرفته در مسیر، اولویت اصلی در راستای ارتقاء بار محوری قطار افزایش شاخص‌های بهره برداری پل‌های موجود از طریق ایجاد تغییرات کم هزینه و

دقت تمام و به شکل جرم‌های گسسته متمرکز شده در مراکز جرم قسمت‌های مختلف واگن شامل محورها، بوژی ها و بدنه واگن مدل سازی شده و ارتباطات بین این جرم ها به وسیله فنر و میراگرها بر قرار میگردد و میتواند نماینده بسیار مناسبی از رفتار نمونه واقعی یک واگن باشد. با توجه به مطالعات صورت گرفته مشخص می‌گردد که اکثر قریب به اتفاق محققین در این زمینه قطار عبوری را به صورت سری بارهای متحرک در نظر گرفته‌اند. مانند وو و دای (Wu & Dai, 1987) که دو بار متحرک را که در جهات مختلف حرکت می‌کردند بر روی یک دهانه ساده پل مدل سازی نموده‌اند. لیو و همکاران (Liu et al., 2009) در پروژه تحقیقاتی خود اثر متقابل بین پل و قطارهای عبوری را مورد بررسی قرار دادند ایشان در مطالعه خود از مدل سازی دو بعدی المان محدود استفاده نموده و پل را به صورت یک تیر دو سر ساده در نظر گرفتند. بررسی ارتعاشات ناشی از عبور قطار و راهکارها و عوامل موثر بر ارتعاشات در خطوط یا ابنیه فنی ریلی با مطالعات فرایبا (Fryba, 1972) و شیا و ژانگ (Xia & Zhang, 2005) در چین اهمیت و فراگیری بیشتری یافت. روش اصلی برای کاهش لرزش و ارتعاشات را کاهش سختی مسیر اعلام کردند. این روش اساسی‌ترین روش مورد استفاده در مسیرهای ریلی جدید و موجود است. راحتی سفر برای تصمیم‌گیری در مورد بهره برداری و نگهداری راه آهن مورد نیاز است (Sadeghi, 2010). وانگ و همکاران (Wang et al., 2022) مطالعه ای در جهت کاهش ارتعاش در پل‌های راه آهن پرسرعت با استفاده از میراگرهای جرمی انجام دادند که برای کاهش ارتعاشات ناشی از قطار در پل‌ها هدف گذاری شده بود. نتایج نشان می‌دهند که میراگر پیشنهادی یک وسیله مفید برای کنترل ارتعاشات و همچنین برای کاهش خیز پل، شتاب‌های مطلق، دوران‌های انتهایی پل و شتاب قطار در سرعت‌های تشدید است. مارتینز-رودریگو و همکاران (Martínez-Rodrigo et al., 2010) مطالعه‌ای تحت عنوان "عملکرد دینامیکی پل‌های راه آهن پرسرعت موجود بهسازی شده با میراگرهای ویسکوز سیال در حالت تشدید" انجام دادند. ایشان در این مطالعه یک راه حل ممکن برای کاهش سطح غیرقابل قبول شتاب قائم عرشه پیشنهاد نمودند که مبتنی بر مقاوم سازی مجدد پل با میراگرهای ویسکوز متصل به دال و به یک سازه کمکی است.

پل‌ها با توجه به تعداد و طول دهانه ارائه گردیده است. همانطور که در جداول مذکور ملاحظه می‌گردد این نوع پل‌ها در اغلب موارد بصورت تک دهانه بوده و طول دهانه آنها در اغلب موارد کمتر از ۴ متر است. ضخامت عرشه این نوع پل‌ها با طول دهانه‌های ۸ تا ۸ متر با توجه به شرایط مختلفی از قبیل تعداد دهانه و ضخامت روسازی، دارای مقادیر مختلفی در بازه بین ۲۵ الی ۱۰۰ سانتیمتر است. اندرکنش دینامیکی پل- قطار از جمله مباحثی است که در دهه‌های اخیر توجه متخصصین و صاحب نظران مهندسی سازه و راه‌آهن را به خود معطوف کرده است. مهمترین پارامترهایی که در این خصوص موثرند، مشخصات فرکانسی سازه پل، مشخصات فرکانسی وسائط نقلیه، ضرایب میرایی پل‌ها و وسائط نقلیه، سرعت و بار محوری وسائط نقلیه، ناهمواری‌های خط و غیره است. هنگام ساخت اولین خط راه آهن در انگلستان در نیمه اول قرن نوزدهم مهندسين دو ایده متفاوت در خصوص اندرکنش خط و قطار داشتند. گروه اول بر این باور بودند که هنگام عبور قطار در طول پل اثر دینامیکی حرکت به بار استاتیکی وسیله اضافه میگردد. در حالی که گروه دوم باور داشتند که سازه فرصت کافی برای تغییرشکل را نداشته و اثر حرکت را درک نخواهد نمود. به همین دلیل در همان دوره آزمایشاتی توسط ویلیس (Willis, 1849) و مطالعات تئوریکی توسط استوکس (Stokes, 1849) صورت گرفت. این مطالعات نشان دادند که اثر واقعی حرکت یک قطار روی پل در بین دو ایده فوق قرار دارد. از آن زمان دینامیک پل‌های راه آهن توجه محققین زیادی را در سرتاسر جهان بخود جلب کرده است. به منظور مدل سازی بارهای عبوری از روی پل راه آهن سه روش کلی وجود دارد: روش بار متحرک، روش جرم متحرک و روش جرم معلق متحرک (Foda & Yang et al., 2004) ; (Abduljabbar, 1998). در روش بارهای متحرک مقدار نیروی قائم منتقل شده از طرف هر واگن یا لکوموتیو به محل محور به شکل یک نیرو اعمال میگردد و اثرات اندرکنش بین خط و وسیله قابل بررسی است. در روش جرم متحرک وسیله به شکل یک جرم گسسته مدل گشته و نیروهای حجمی و یا وزن به جرم آن اعمال می‌گردد اما همچنین به دلیل عدم وجود و در نظرگیری اثرات سختی و میرایی و ارتباط بین جرم‌های مختلف امکان در نظر گرفتن اثرات موثر اندرکنش دینامیکی به شکل صحیح فراهم است. اما در روش سوم وسیله نقلیه با

جدول ۱. فراوانی تعداد پل عرشه دال بتنی بر حسب تعداد دهانه

تعداد دهانه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تعداد پل	۱۰۳۸۳	۷۸۸	۴۹۶	۱۰۹	۱۱۰	۳۹	۳۰	۹	۹	۸

جدول ۲. فراوانی تعداد پل عرشه دال بتنی بر حسب طول دهانه

طول دهانه (متر)	تا ۲ متر	تا ۴ متر	تا ۶ متر	تا ۸ متر	بیش از ۸ متر
تعداد پل	۳۴۴۸	۲۳۷۰	۱۰۷۶	۷۵۱	۶۸۸
درصد فراوانی	۴۲ درصد	۲۸ درصد	۱۳ درصد	۹ درصد	۸ درصد

است. در نتایج این مطالعه مشاهده می‌گردد که در قسمت های مختلفی از طول پل تاثیر کاهش یا افزایش سختی تکیه‌گاه پل متفاوت است. اما بصورت کلی مقادیر مطلق شتاب عرشه پل با افزایش سختی تکیه‌گاه پل، کاهش می‌یابد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) در مطالعه‌ای بر روی پل ۳۲ متری با مقطع جعبه‌ای تاثیر سختی تکیه‌گاه پل بر روی میرایی ارتعاشات پل حاصل از عبور قطار را بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که برای پل مد نظر در این مطالعه در بازه‌های فرکانسی مختلف و در سرعت‌های مختلف عبوری قطار، تاثیر سختی‌های تکیه‌گاهی پل می‌تواند متفاوت باشد. به گونه‌ای که مثلاً در یک بازه فرکانسی رفتار و تاثیر سختی تکیه‌گاهی پل کاملاً برعکس رفتار و تاثیر همان سختی تکیه‌گاهی در یک بازه فرکانسی دیگر باشد. در مطالعه دیگری تحت عنوان "استفاده از تکیه‌گاه‌های الاستیک پل برای کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار"، لی و همکاران (Li et al., 2016) به بررسی میدانی و عددی تاثیر استفاده از تکیه‌گاه‌های الاستیک پل در کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار در اطراف خط ریلی و اطراف پل راه آهن پرداخته‌اند که در این مطالعه چهار نوع سختی تکیه‌گاه الاستیک پل را در کاهش ارتعاشات بررسی کرده‌اند. آنها در این مطالعه بعد از انجام تست میدانی برای صحت سنجی مدل عددی ساخته شده در نرم افزار المان محدود Abaqus، به بررسی ارتعاشات و شتاب قائم و نیروهای ایجاد شده در تکیه‌گاه‌های الاستیک پل، زمین اطراف پل و قطار عبوری در سرعت ۳۵۰ کیلومتر بر ساعت تا فاصله‌های مختلفی تا حدود ۲۵ متر از پل پرداخته‌اند. نوع پل

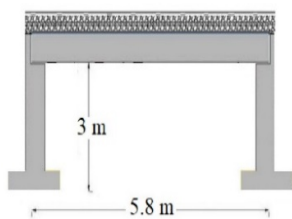
مولینر و همکاران (Moliner et al., 2017) در مطالعاتی در راستای مقاوم سازی پل‌های راه آهن موجود با دهانه ۱۰ الی ۲۵ متر برای عبور قطار با سرعت بالا با استفاده از میراگرهای ویسکوالاستیک و ارزیابی تاثیر انعطاف پذیری تکیه‌گاه‌های الاستومتریکی برای کاهش ارتعاشات پل‌های مورد نظر انجام دادند. جهانگیری و ذاکری (Jahangiri & Zakeri, 2017) به بررسی دینامیکی پل‌های بتنی با مقطع جعبه‌ای یک خطه و دو خطه راه آهن در مقابل افزایش سرعت سیر قطار پرداخته‌اند. ایشان در این مطالعه پل و قطار را به صورت المان محدود سه بعدی در نرم افزار Abaqus مدل سازی نموده و شتاب قائم و خیز پل را به عنوان معیارهای ارزیابی رفتار پل در مقابل افزایش سرعت سیر قطار مورد بررسی قرار داده‌اند. اسماعیلی و همکاران (Esmaili et al., 2020)، با مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus به بررسی میدانی تاثیر خرده لاستیک بر کاهش ارتعاشات پل با عرشه دال بتنی به دهانه چهار متر پرداختند. رفتار دینامیکی پل و روسازی آن قبل از اجرا و بعد از اجرای زیربالاست خرده لاستیکی، تحت تاثیر عبور لوکوموتیو GT26 با سرعت‌های مختلف و حالت استاتیکی بررسی گردیده است. نتایج این مطالعه، نشان‌دهنده تاثیر مثبت این مصالح در کاهش ارتعاشات ناشی از تردد قطار و ضربه‌های وارده است. در مطالعه اردونن و همکاران (Erduran et al., 2022) بر روی پل با دهانه ۵۰ متری در سه حالت تک دهانه، دو دهانه و سه دهانه، تاثیر چند نوع سختی تکیه‌گاهی پل بر روی ارتعاشات پل ناشی از عبور قطار با سرعت‌های ۵۰، ۸۰ و ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت بررسی شده



شکل ۱. ساختار انجام مطالعه

۲-۱- مشخصات پل و تست میدانی

اعتبار سنجی و کنترل صحت نتایج مدل المان محدود از طریق مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی المان محدود با نتایج تست میدانی پل مورد مطالعه (Esmaeili et al., 2020) انجام پذیرفته است. طول کلی پل مورد نظر ۵٫۸ متر با طول دهانه آزاد ۴ متر، عرض آن ۴ متر و ضخامت عرشه پل ۵۰ سانتی متر است. عرشه به صورت تیر دو سر ساده بر روی پایه‌ها قرار گرفته و ارتفاع وسط دهانه پل از سطح زمین ۳ متر است. ریل استفاده شده در این خط U33 و تراورس‌های آن از نوع فلزی و با فاصله ۵۰ سانتی متر هستند. ضخامت بالاست بر روی عرشه ۴۰ سانتی متر و عرض بالاست اجرا شده بر روی عرشه پل ۳٫۲ متر است. (Esmaeili et al., 2020)



شکل ۲. شکل شماتیک پل و خط در تست میدانی

راه آهن مورد مطالعه توسط این محققان پل بتنی با عرشه بتنی جعبه ای بوده است. با توجه به مطالعات پیشین راهکارهای متنوعی به منظور بهسازی پل‌ها در راستای بررسی عملکرد آنها در مقابل تغییرات شرایط بهره‌برداری از آنها و کاهش ارتعاشات در خطوط راه آهن استفاده شده است. در مطالعه حاضر بررسی دقیق این امر در پل‌های با عرشه دال بتنی موجود به خصوص پل‌های با دهانه کمتر از ۱۰ متر در جهت افزایش سرعت سیر و بار محوری قطارهای عبوری مورد توجه قرار گرفته است.

۲- معرفی مصالح مصرفی

در این مطالعه به منظور مدل سازی و تحلیل سیستم مشترک پل و قطار از مدل المان محدود سه بعدی استفاده شده و اندرکنش بین آنها با استفاده از تئوری هرتز (Bhaskar et al., 1997) ایجاد شده است. در ادامه مدل ایجاد شده با مقایسه مقادیر جابجایی قائم عرشه پل حاصل از مدل تحلیلی و تست میدانی و همچنین مقایسه مقادیر فرکانس مودی و شتاب قائم عرشه پل اعتبار سنجی شده و نتایج آنالیز حساسیت مد نظر بررسی می‌گردد. مدل سازی ناوگان و پل با استفاده از روش المان محدود انجام پذیرفته است. ناوگان به صورت سه بعدی مدل سازی شده و برای هر وسیله با ۶ محور ۳۳ درجه آزادی در نظر گرفته شده است. پل به صورت تک خطه، دهانه ساده و با سیستم عرشه دال بتنی است. روسازی به صورت بالاستی است. ریل‌ها و فنرها و میراگرهای مربوط به پد و پابند مدل سازی شده‌اند. طول دهانه‌های منتخب پل برای تحلیل ۲، ۴، ۶ و ۸ متر در نظر گرفته شده است. ناوگان با سرعت‌های مختلف (بین ۲۰ تا ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت) از روی پل عبور میکند. بار محوری در چهار حالت ۱۸، ۲۰، ۲۲٫۵ و ۲۵ تن هستند. اهداف در نظر گرفته شده در این مطالعه بررسی وضعیت فعلی پل‌های با عرشه دال بتنی موجود راه آهن از لحاظ سطوح بهره برداری پل شامل جابجایی قائم (خیز) دهانه، شتاب قائم عرشه در مقابل افزایش سرعت و بار محوری قطار در طول دهانه‌های منتخب، و تعیین حداکثر سرعت و بار محوری بهینه عبوری بر اساس شرایط فعلی پل‌های مذکور است. با توجه به فرضیات و اهداف متصور روند انجام مطالعه مطابق با شکل ۱ است.

نهایی مدل پل و خط به همراه وسیله نقلیه در شکل ۵ مشاهده می‌گردد.

۲-۴- تحلیل مودال و تعیین ابعاد مش‌بندی بهینه

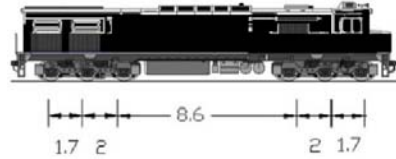
یکی از پارامترهای موثر در نتایج تحلیل المان محدود، ابعاد مش‌بندی مدل است. به طور کلی هر چه المان‌ها کوچک‌تر باشد، نتایج حاصل از مدل دقیق‌تر است. اما، در مقابل زمان بیشتری صرف تحلیل می‌گردد. لذا در اولین گام تحلیل مودال با ابعاد مختلف مش‌بندی بر روی مدل پل صورت پذیرفته و نتایج مدهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج جدول ۵ مقادیر فرکانس‌های طبیعی مودهای اول تا چهارم با کاهش ابعاد مش‌بندی از ۱۵ به ۱۰ سانتی‌متر تغییر چشمگیری نکرده و همگرا است. لذا، در ادامه مراحل تحلیل ابعاد مش‌بندی ۱۵ سانتی‌متر به عنوان ابعاد مش‌بندی بهینه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۵- شرایط مرزی مدل سازی المان محدود

در مطالعات (Su et al., 2010; Du Kim & Warnitchai, 2009) به منظور ساده‌سازی محاسبات و با فرض‌های ساده کننده ورودی و خروجی دهانه به صورت صلب و بدون جابجایی نسبت به پل در نظر گرفته شده‌اند، اما در این مطالعه به منظور در نظرگیری اثرات ورودی و خروجی در دهانه مورد مطالعه، با در نظرگیری سختی معادل خاک طرفین پل با مدل سازی بصورت المان فنر به اندازه دو دهانه در قیل و بعد از دهانه مد نظر مدل سازی شده است. در شکل ۵ دهانه اصلی و فنرهای دهانه‌های کناری قابل مشاهده هستند. به منظور حذف خطا در محاسبات درجات آزادی انتقالی ریل در جهت عرضی پل بسته شده است.

۲-۲- شرایط نحوه بارگذاری تست میدانی

دو لوکوموتیو GT26 که به یکدیگر متصل گردیده‌اند با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت از روی خط عبور کرده‌اند. بار محوری لوکوموتیوها ۱۸ تن بوده و فاصله بین محورها و بوژی‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. فاصله بین محورها (برحسب متر) در دیزل‌های مورد استفاده در تست میدانی

۲-۳- مدل سازی وسیله نقلیه

مدل المان محدود قطار شامل مجموعه‌ای از جرم‌های نقطه‌ای شامل بدنه، بوژی و محورها، فنرها و میراگرهایی که در اتصالات بدنه به بوژی و بوژی به چرخ محورها وجود دارند، است. یک مدل کلی از واگن سستی شش محوره شامل سیستم تعلیق اولیه با سختی و میرایی K و C، سیستم تعلیق ثانویه با سختی و میرایی K و C، جرم چرخ محورها M_w ، جرم بوژی M_b ، جرم بدنه واگن M_c است.

مشخصات فنی لوکوموتیو GT 26 تست میدانی در جدول ۳ ارائه گردیده است. در شکل ۴ تصویر مدل لکوموتیو و مدل سازی فنر هرتز با المان‌های فنر مشاهده می‌گردد. مقادیر مشخصات فنی مصالح بتنی با استفاده از آزمایش چکش اشमित و قسمت‌های بالاستی با آزمایش جعبه بالاست توسط اسماعیلی و همکاران (Esmaeili et al., 2020) قبل از انجام تست میدانی، بر روی پل مدنظر انتخابی برای این کار بدست آمده است و در جدول ۴ قابل مشاهده است. نمای کلی و

جدول ۳. مشخصات فنی لوکوموتیو تست میدانی (Sotoudeh et al., 2020)

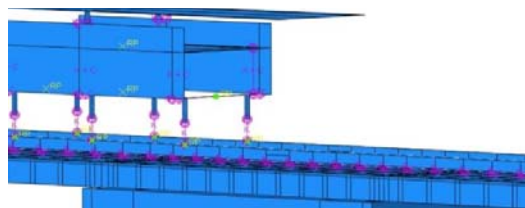
نام	مشخصه	واحد	لوکوموتیو
Mass of car-body	M_c	ton	68
Mass of bogie	M_b	ton	3.4
Sec. suspension stiffness	$K_{2z}; K_{2y}$	KN/m	220;1040
Sec. suspension damping	$C_{2z}; C_{2y}$	KNS/m	95;120
Pri. suspension stiffness	$K_{1z}; K_{1y}$	KN/m	2890;1683
Pri. suspension damping	$C_{1z}; C_{1y}$	KNS/m	80;35
Mass of wheel-axle	M_w	ton	1.8

جدول ۴. مشخصات فنی مصالح مدل‌سازی در نرم افزار المان محدود آباکوس

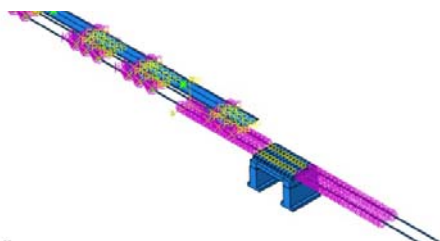
مشخصات فنی پل و خط	مدول ارتجاعی (MN/m)	جرم واحد حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضریب پواسون	نسبت میرایی (ξ)	α	β
بالاست	۱۵۰	۱۸۰۰	۰٫۱	۰٫۱۱	۵٫۸	۰٫۰۰۰۳۲۷
عرشه بتنی	۱۱۱۰۵	۲۴۰۰	۰٫۱۸	۰٫۰۵	۱۱٫۴۴	۰٫۰۰۱۰۵
تراورس فلزی	۲۱۰۰۷۱	۶۱۸۶	۰٫۳			
ریل U33	۲۱۰۰۷۱	۶۱۸۶	۰٫۳			

جدول ۵. نتایج فرکانس مودی

اندازه مش (سانتی‌متر) شماره مود	فرکانس مودی (1/sec)				
	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰
۱	۲۶٫۷۷	۲۴٫۲۳	۲۲٫۵۱	۲۰٫۴۲	۲۰٫۱۸
۲	۳۳٫۸۲	۳۱٫۴۶	۲۹٫۱۷	۲۸٫۱۹	۲۷٫۷۹
۳	۶۹٫۱۲	۶۷٫۵۶	۶۴٫۳۸	۶۲٫۷۶	۶۱٫۶۱
۴	۷۹٫۲۸	۷۷٫۳۵	۷۳٫۴۴	۷۱٫۷۷	۷۰٫۹۱



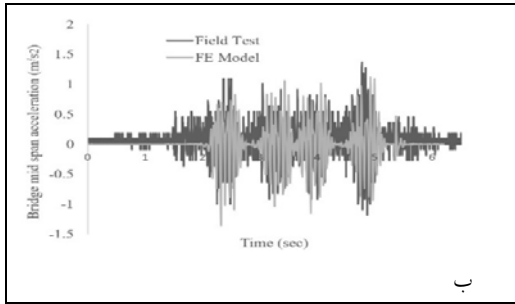
شکل ۴. مدل بدنه لوکوموتیو و مدل سازی فتر هرتز با المان های فتر



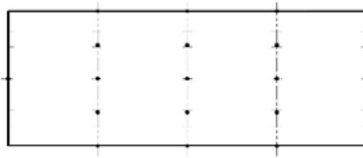
شکل ۵. نمای کلی و نهایی مدل پل و خط به همراه وسیله نقلیه

۲-۶- اعتبار سنجی مدل

در این بخش مدل المان محدود بر اساس نتایج حاصل از تست میدانی اعتبار سنجی شده است. برای این منظور نتایج تحلیل مودال و همچنین نتایج تاریخچه زمانی جابجایی و شتاب وسط دهانه پل تحت عبور دو لوکوموتیو GT26 با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت مورد توجه قرار گرفته است. مقدار فرکانس مودی محاسباتی در مود اول ارتعاشی برابر $20/42$ هرتز به دست آمده است که در مقایسه با نتیجه حاصل در تست میدانی (Esmaili et al., 2020) برابر با $20/03$ هرتز دارای تطابق نسبتاً مناسبی است. همچنین مقایسه مقادیر جابجایی و شتاب قائم وسط دهانه در مدل المان محدود و تست میدانی در شکل ۶ قابل ملاحظه است. نتایج مدل المان محدود در این بخش نیز بصورت خوبی بر نتایج تست میدانی منطبق بوده و نشان دهنده صحت رفتار مدل المان محدود است.



شکل ۶. پاسخ عرشه پل در وسط دهانه در تست میدانی و مدل عددی. الف: جابجایی قائم در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت، ب: شتاب قائم در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت

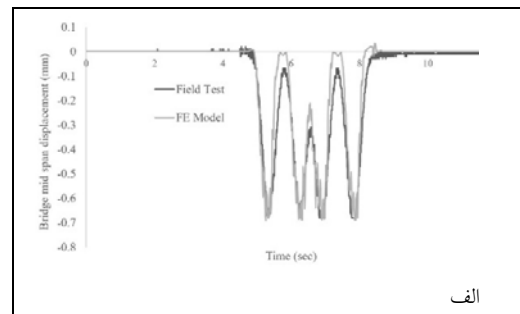


شکل ۷. نقاط هدف ثبت نتایج در عرشه پل

در راستای بررسی و تحلیل نتایج پل با عرشه دال بتنی در مقابل افزایش سرعت و بار محوری قطار، چهار طول دهانه پرتکرار در راه آهن ایران شامل دهانه‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ متری برای انجام تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. در راستای امکان سنجی افزایش سرعت و بار محوری قطار عبوری از روی پل، تحلیل‌های پارامتریک سرعت، بار محوری و طول دهانه‌ها انجام گرفته و نتایج در قالب نمودارهای مقادیر بیشینه جابجایی قائم (شکل ۸) و بیشینه شتاب قائم پل (شکل ۹) در دهانه‌های مختلف، بار محوری‌های منتخب و در سرعت‌های مختلف ارائه گردیده است. با توجه به نتایج حاصل بیشینه مقادیر جابجایی قائم پل (شکل ۸) ملاحظه می‌گردد که در اکثریت حالات، پاسخ عرشه پل در حالت بار محوری ۱۸ تن دارای کمترین مقادیر بیشینه جابجایی قائم عرشه در بین سایر حالات است. همچنین در شرایط بار محوری ۲۵ تن، بیشینه مقادیر جابجایی قائم عرشه پل بیشترین مقدار را دارا هستند. در همه دهانه‌های منتخب و با توجه به انواع بارهای محوری و همچنین در همه سرعت‌های سیر قطار، مقدار بیشینه جابجایی قائم دهانه پل در بیشترین حالت ممکن به حدود یک و نیم میلی‌متر رسیده و با توجه به آیین نامه‌های UIC (2009) و EN 1990 (2002)، از منظر جابجایی قائم دهانه پل مشکلی برای پل‌های مورد نظر در مقابل افزایش سرعت و بار محوری قطار در هیچ کدام از

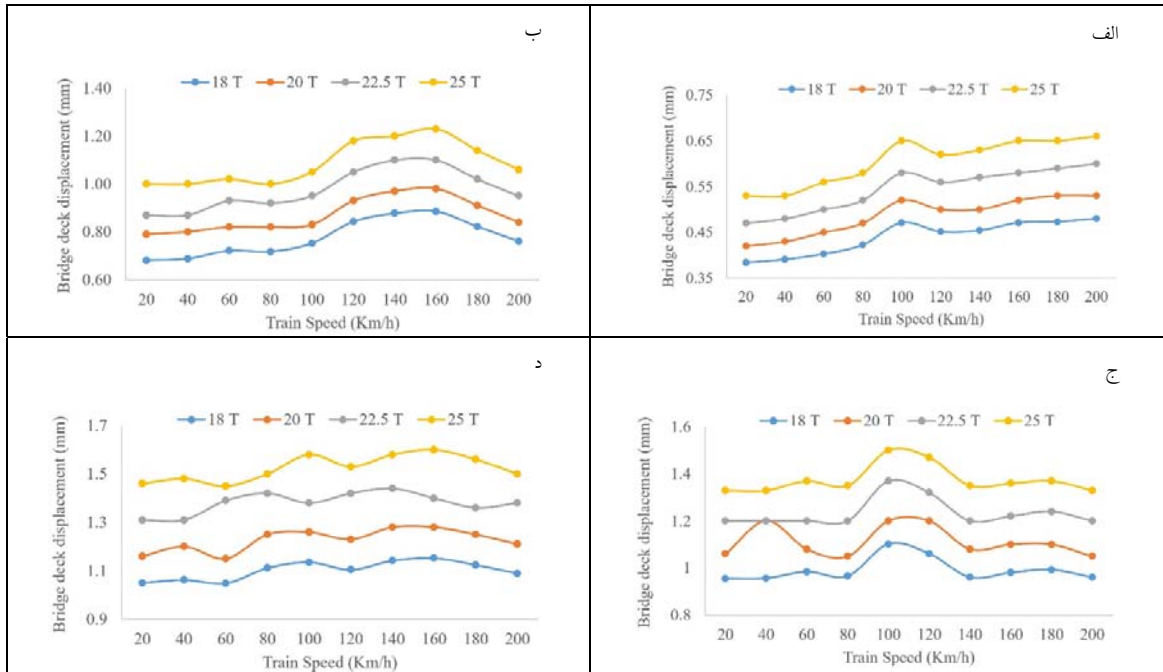
۳- نتایج تحلیل

بعد از اطمینان از صحت رفتار و نتایج حاصل از مدل المان محدود، در این بخش نتایج تحلیل حساسیت‌های انجام پذیرفته ارائه و بررسی می‌گردد. در این مطالعه مقادیر پاسخ‌های دینامیکی پل تحت عبور قطار با سرعت‌ها و بار محوری‌های مختلف ارائه می‌شود. مقادیر نتایج جابجایی و شتاب در نقاط مختلف پل در قسمت‌های میان دهانه و یک چهارم دهانه پل مطابق با شکل ۷ ثبت شده و بیشینه مقادیر آنها در نمودارهای نتایج ارائه گردیده است.



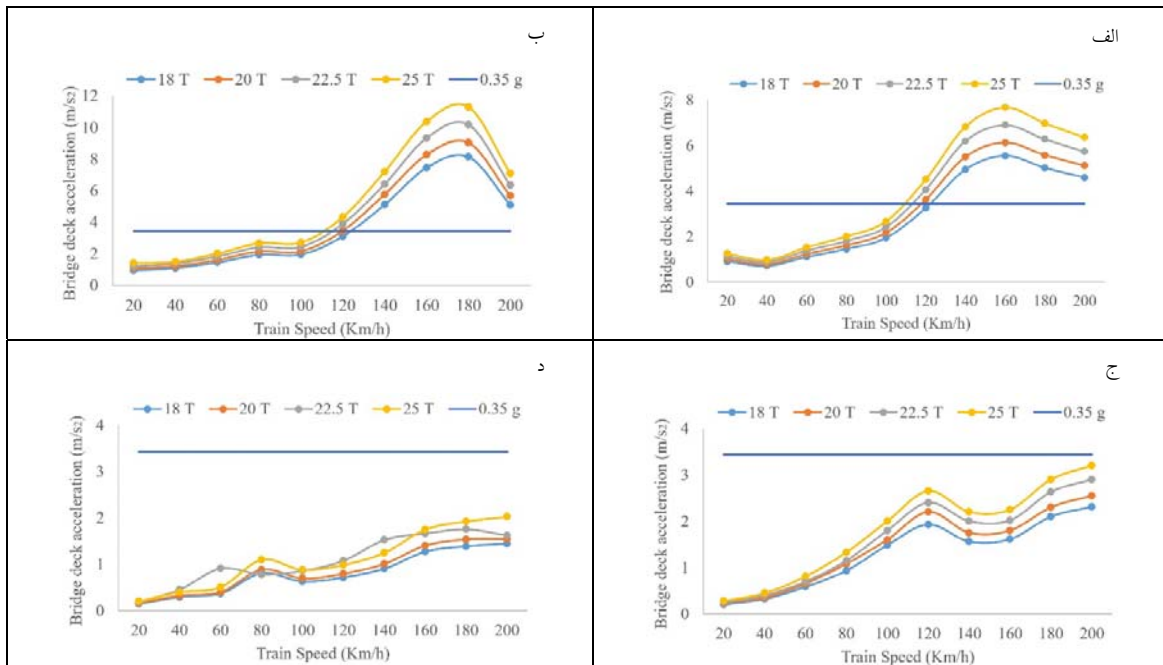
کیلومتر بر ساعت، پاسخ‌های عرشه پل بحرانی محسوب می‌شوند.

دهانه‌های منتخب وجود نخواهد داشت. اما از منظر سرعت و بار محوری بحرانی می‌توان گفت در سرعت‌های ۱۰۰ و ۱۶۰



شکل ۸. مقادیر بیشینه جابجایی عرشه پل در شرایط تکیه‌گاهی و سرعت و بار محوری‌های مد نظر

الف: دهانه ۲ متری، ب: دهانه ۴ متری، ج: دهانه ۶ متری و د: دهانه ۸ متری

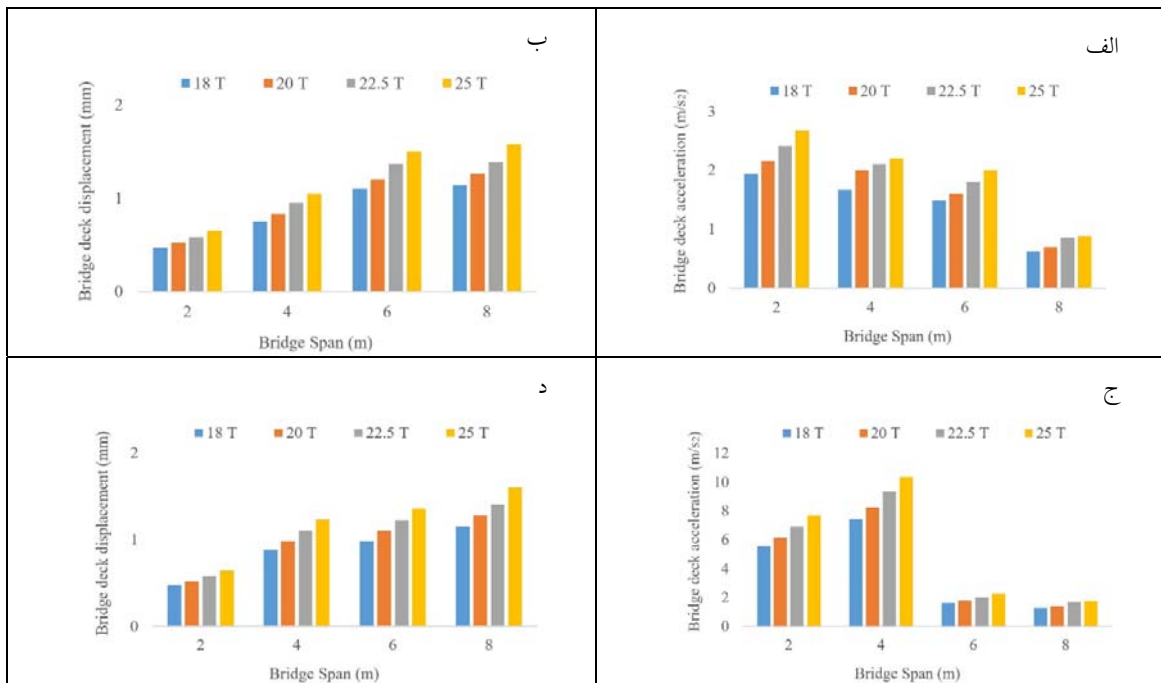


شکل ۹. مقادیر بیشینه شتاب قائم عرشه پل در شرایط تکیه‌گاهی و سرعت و بار محوری‌های مد نظر

الف: دهانه ۲ متری، ب: دهانه ۴ متری، ج: دهانه ۶ متری و د: دهانه ۸ متری

(۰/۳۵g) می‌شود. اما در پل‌های با دهانه ۶ و ۸ متری در تمامی حالات مقدار شتاب قائم عرشه پل در محدوده مجاز قرار دارد. با توجه به نتایج حاصله در این قسمت مشخص می‌گردد که وضعیت شتاب قائم عرشه پل در پل‌های با دهانه کوتاه‌تر (۲ و ۴ متر) در مقایسه با پل‌های با دهانه بلندتر (۶ و ۸ متر) بحرانی است. با توجه به نتایج شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد که با افزایش طول دهانه پل در هر چهار حالت طول دهانه پل و در اغلب سرعت سیرها، بیشینه جابجایی قائم عرشه پل افزایش یافته اما بیشینه شتاب قائم عرشه پل کاهش می‌یابد. البته این روند در سرعت سیر ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت، در پل با دهانه ۴ متر استثنائاً رفتار برخلاف روند کلی نشان داده است که می‌تواند نشانه‌ای از ایجاد پدیده تشدید به علت همگرا شدن فرکانس‌های طبیعی پل و فرکانس‌های تحریک ناشی از افزایش بار محوری و یا سرعت سیر وسیله نقلیه عبوری از روی پل باشد.

با توجه به نتایج حاصل شده در شکل ۹ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بصورت کلی با افزایش سرعت و بار محوری وسیله نقلیه عبوری از روی پل، پاسخ‌های بیشینه عرشه پل افزایشی بوده و با افزایش ۴۰ درصدی بار محوری از ۱۸ به ۲۵ تن، افزایش شتابی معادل با ۳۰ درصد افزایش در پاسخ‌های پل مشاهده می‌گردد. برای پل با دهانه ۲ و ۴ متری ملاحظه می‌گردد که پاسخ هر کدام از پل‌ها به ترتیب در سرعت سیر ۱۶۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت بحرانی است. همچنین با توجه به نتایج حاصله پل با دهانه ۶ متری مشاهده می‌شود که پاسخ پل در سرعت‌های ۱۲۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت بحرانی است. نتایج پل با دهانه ۸ متری نیز نشان می‌دهد که پاسخ پل در سرعت‌های ۸۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت بحرانی است. بصورت کلی می‌توان گفت در پل‌های ۲ و ۴ متری، بیشینه شتاب قائم عرشه پل در سرعت سیرهای بالای ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت وارد محدوده غیرمجاز شتاب قائم عرشه پل



شکل ۱۰. تاثیر طول دهانه بر پاسخ عرشه پل الف: بیشینه شتاب قائم در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، ب: بیشینه جابجایی قائم پل در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، ج: بیشینه شتاب قائم در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت و د: بیشینه جابجایی قائم پل در سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت

۴- نتیجه گیری

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 211(1), 11-26.

doi.org/10.1243/095440997153086

-Du Kim, K., & Warnitchai, P., (2009).

Dynamic analysis of three-dimensional bridge-high-speed train interactions using a wheel-rail contact model. *Engineering Structures*, 31(12), 3090-3106.

doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.015

-EN1990 (2002) Annex A2: Application for bridges. Nov.

-Erduran, E., Nordli, C., & Gonen, S., (2022).

Effect of Elastomeric Bearing Stiffness on the Dynamic Response of Railway Bridges Considering Vehicle-Bridge Interaction. *Applied Sciences*, 12(23), 11952.

doi.org/10.3390/app122311952

-Esmaili, M., Ataei, S., & Siahkouhi, M. (2020). A case study of dynamic behaviour of short span concrete slab bridge reinforced by tire-derived aggregates as sub-ballast. *International Journal of Rail Transportation*, 8(1), 80-98.

doi.org/10.1080/23248378.2019.1613938

-Foda, M. A., & Abduljabbar, Z. (1998). A dynamic green function formulation for the response of a beam structure to a moving mass. *Journal of sound and vibration*, 210(3), 295-306.

-Fryba, L. (1972). *Vibration of solids and structures under moving loads*, 1st. Edition, Groningen (The Netherlands): Noordhoff International Publishing.

-Jahangiri, M., & Zakeri, J. A., (2017). Dynamic analysis of train-bridge system under one-way and two-way high-speed train passing. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 64(1), 33-44.

doi.org/10.12989/sem.2017.64.1.033

-Li, X., Zhang, Z., & Zhang, X. (2016). Using elastic bridge bearings to reduce train-induced ground vibrations: An experimental

این مطالعه بر مبنای بررسی امکان سنجی افزایش سرعت و بار محوری قطار بر روی پل‌های با عرشه دال بتنی موجود و تحت سرویس راه‌آهن در شبکه ریلی کشور است. در این مطالعه به بررسی پاسخ پل با عرشه دال بتنی موجود با دهانه کوتاه در مسیر خطوط راه‌آهن در حالت‌های مختلف سرعت و بار محوری پرداخته شده است. سرعت سیرهای قطار از سرعت ۲۰ الی ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه از روش المان محدود سه بعدی در مدل سازی سیستم پل، قطار و اندرکنش بین آنها استفاده شده و به منظور اعتبار سنجی مدل از نتایج تست میدانی معتبر استفاده گردیده است. بررسی پاسخ‌های مجموعه پل، قطار و اندرکنش میان آنها، شامل بررسی نتایج جابجایی قائم و شتاب قائم عرشه پل در حین عبور از روی پل است. نتایج حاصله مشخص نمود که با افزایش سرعت و بار محوری، پاسخ‌های بیشینه عرشه پل افزایشی بوده و با افزایش ۴۰ درصدی بار محوری از ۱۸ به ۲۵ تن، با ۳۰ درصد افزایش در پاسخ‌های پل مواجه می‌گردد. همچنین برای پل با دهانه ۲ و ۴ متری ملاحظه می‌گردد که پاسخ پل به ترتیب در سرعت سیر ۱۶۰ و ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت بحرانی بوده و در پل با دهانه ۶ متری پاسخ پل در سرعت‌های ۱۲۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت بحرانی قلمداد می‌گردد. نتایج پل با دهانه ۸ متری نیز نشان می‌دهد که پاسخ پل در سرعت‌های ۸۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت از منظر شتاب قائم عرشه پل بحرانی است. بصورت کلی می‌توان گفت در پل‌های ۲ و ۴ متری، بیشینه شتاب قائم عرشه پل در سرعت سیرهای بالای ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت وارد محدوده غیرمجاز شتاب قائم عرشه پل (۰/۳۵g) شده ولی در پل‌های با دهانه ۶ و ۸ متری در تمامی حالات مقدار شتاب قائم عرشه پل در محدوده مجاز و کمتر از مقدار مذکور قرار دارد. همچنین از منظر آیین‌نامه‌ای در مورد بیشینه جابجایی قائم عرشه پل در تمامی دهانه‌های منتخب هیچ مشکلی مبنی بر تجاوز و تخطی از مفادیر مجاز آیین‌نامه ای مشاهده نگردید.

۵- مراجع

-Bhaskar, A., Johnson, K. L., Wood, G. D., & Woodhouse, J., (1997). *Wheel-rail dynamics with closely conformal contact Part 1: dynamic modelling and stability analysis.*

-Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., Hernandez Jr, J. Y., & Seki, M. (2010). Vibration of reinforced concrete viaducts under high-speed train passage: measurement and prediction including train–viaduct interaction. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(5), 621-633.
doi.org/10.1080/15732470903068888

-UIC 712R, (2009). Appendices 2201 & 2202, Short Pitch Corrugation. *Long Pitch Corrugation*.

-Wang, L., Shi, W., & Zhou, Y. (2022). Adaptive-passive tuned mass damper for structural aseismic protection including soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 158, 107298.
doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107298

-Willis, R. (1849). Preliminary essay to the Appendix B: Experiments for determining the effects produced by causing weights to travel over bars with different velocities. *Report of the commissions appointed to inquire into the application of iron to railway structures*, London.

-Wu, J. S., & Dai, C. W. (1987). Dynamic responses of multispan nonuniform beam due to moving loads. *Journal of structural Engineering*, 113(3), 458-474.

-Xia, H., & Zhang, N. (2005). Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains. *Computers & Structures*, 83(23-24), 1891-1901.
doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.014

-Yang, Y. B., Yau, J. D., Yao, Z., & Wu, Y. S. (2004). Vehicle-bridge interaction dynamics: with applications to high-speed railways. *World Scientific*.

-Zhang, S. Y., Sheng, X., Jiang, J. Z., Zhou, H., Ren, W. X., & Zhang, Z. H. (2021). Vibration suppression of bridges under moving loads using the structure-immittance approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, 211, 106792.
doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106792

and numerical study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 78-90.

doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.03.013

-Liu, K., De Roeck, G., & Lombaert, G., (2009). The effect of dynamic train–bridge interaction on the bridge response during a train passage. *Journal of sound and vibration*, 325(1-2), 240-251.

doi.org/10.1016/j.jsv.2009.03.021

-Martínez-Rodrigo, M. D. L. D., Lavado, J., & Museros, P. (2010). Dynamic performance of existing high-speed railway bridges under resonant conditions retrofitted with fluid viscous dampers. *Engineering Structures*, 32(3), 808-828.
doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.008

doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.008

-Moliner, E., Martínez-Rodrigo, M. D., & Museros, P. (2017). Dynamic performance of existing double track railway bridges at resonance with the increase of the operational line speed. *Engineering Structures*, 132, 98-109.

doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.031

-Sadeghi, J. (2010). Field Investigation on Vibration Behavior of Railway Track Systems. *International Journal of Civil Engineering*, 8(3), 232-241.

-Sotoudeh, S., Jahangiri, M., Ranjbarnia, M., & Zakeri, J. A. (2020). Three-dimensional modeling of an old masonry bridge and assessing its current capacity. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2), 460-473.
doi.org/10.3311/PPci.14942

doi.org/10.3311/PPci.14942

-Stokes, S. G. G. (1849). Discussion of a differential equation relating to the breaking of railway bridges. *Printed at the Pitt Press by John W. Parker*.

Evaluation of Train Speed and Axle Load Increase on Railway Bridges

*Seyed Danial Mousavi, Ph. D., Student, School of Railway Engineering, Iran University
of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Jabbar Ali Zakeri, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and
Technology, Tehran, Iran.*

*Seyed Javad MirMohammad Sadeghi, Professor, School of Railway Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Meysam Jahangiri, Assistant Professor, School of Railway Engineering, Iran University
of Science and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: zakeri@iust.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

Since the establishment of the railway system, railway engineers worldwide have been striving to enhance the speed and axle load of trains. Numerous efforts have been made to develop various railway networks. The acceptance of this mode of transportation can be enhanced by increasing the axle load and running speed of trains. This study aims to investigate the potential of enhancing the speed and axial load of trains by examining existing bridges in Iran's railway network because constructing new lines and structures can be costly. Specifically, this study focuses on bridges with concrete slab decks, which are prevalent in the network. A three-dimensional finite element model of the bridge and train was developed, considering the interaction between the two, and was validated through a field test. The study then analyzed the impact of increased speed and axial load on the vertical displacement and acceleration of the bridge. The results indicated that although the response of the bridge deck increased with higher speeds and axial loads, it did not satisfy the regulatory standards from a vertical displacement and acceleration perspective.

Keywords: Train Speed, Axle Load Increase, Track and Train Interaction, Railway Bridge, Finite Element Model