

تخمین ضریب ضربه در پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطار پرسرعت پردیس

مقاله علمی - پژوهشی

پیمان عظیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

مهدی یزدانی*، استادیار، مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m-yazdani@araku.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۲۲۰-۲۰۵

چکیده

یکی از مهمترین پارامترهایی که می‌تواند رفتار دینامیکی پل را تحت اثر عبور قطار بیان نماید ضریب ضربه و یا بار دینامیکی مجاز است. این پارامتر در آیین‌نامه‌های طراحی پل‌ها در برابر عبور قطار به جای تحلیل‌های طاقت‌فرسای دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با وجود اینکه استفاده از ضریب ضربه در برخی موارد پاسخ‌های محافظه‌کارانه‌ای ارائه می‌دهد، اما استفاده از این ضرایب و روابط احتمالی مستخرج از آنها به دلیل صرفه‌جویی در هزینه‌های محاسباتی، تنها جایگزین مناسب تحلیل‌های دینامیکی است. پل‌های قوسی بنایی از لحاظ هندسی و رفتاری سازه‌های پیچیده‌ای هستند و تهیه مدل عددی و انجام تحلیل دینامیکی باتوجه به تعدد آنها امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین محاسبه ضریب ضربه ناشی از عبور قطارهای پرسرعت می‌تواند رفتار اولیه پل‌های قوسی بنایی را مشخص نماید و بستر استفاده از این زیرساخت‌های مهم ریلی را فراهم نماید. برای این منظور در مطالعه حاضر ابتدا مدل اجزای محدود دو پل قوسی بنایی که از لحاظ مشخصات هندسی و مکانیکی کاملاً متفاوت هستند تهیه شد و در ادامه با انجام ۵۲ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی ضریب ضربه و بار دینامیکی مجاز محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار پل‌های قوسی بنایی در شرایط مختلف در برابر قطار پرسرعت پردیس مناسب است و همه ضرایب ضربه محاسبه شده در محدوده مناسبی قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: پل‌های قوسی بنایی، تحلیل دینامیکی، قطار پرسرعت پردیس، ضریب ضربه، ضریب بار دینامیکی مجاز

۱-مقدمه

قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت یک امر ضروری است. از سوی دیگر، مطالعه در مورد بارهای دینامیکی ناشی از حرکت قطارهای پرسرعت در مقایسه با بار ناشی از قطارهای معمولی اهمیت بیشتری دارد، چرا که امروزه با توجه به اهمیت زمان جابجایی مسافر و کالا و با افزایش سرعت حرکت در خطوط ریلی، استفاده از قطارهای پرسرعت رشد روزافزون داشته است. پیشینه مطالعه رفتار دینامیکی پل‌ها (پل‌های عرشه‌ای) تحت اثر بار وسایل نقلیه به حدود یک قرن پیش باز می‌گردد و بالطبع مطالعه رفتار پل‌ها تحت اثر عبور قطارهای پرسرعت، از زمانی که اولین قطارهای پرسرعت در جهان مورد استفاده قرار گرفتند آغاز شده است. اولین قطار پرسرعت دنیا در ژاپن و با نام شینکانسن در سال ۱۹۶۴

پل‌های قوسی بنایی به تعداد زیادی در شبکه راه‌آهن کشور موجود هستند. با توجه به قدمت بیش از ۸۰ ساله شبکه راه‌آهن، این پل‌ها برای بارهای سرویس آن زمان (قطارهای با سرعت پایین) طراحی شده‌اند و در حال حاضر نیز برای قطارهایی با سرعت حداکثر ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در حال سرویس‌دهی هستند. در چند دهه گذشته استفاده از قطارهای پرسرعت در نقاط مختلف جهان به شدت گسترش یافته است و در سال‌های اخیر نیز زمره استفاده از این قطارها در کشور شنیده شده است. در حال حاضر در شبکه راه‌آهن کشور در حدود ۳۴۰۰ پل قوسی بنایی وجود دارد که جایگزین کردن آنها به علت محدودیت‌های زمانی، میدانی و اقتصادی اصلاً امکان‌پذیر نیست، بنابراین ارزیابی رفتار دینامیکی پل‌های

خواهد بود. معرفت و همکاران در تحقیقات جداگانه‌ای به مطالعه ظرفیت استاتیکی و دینامیکی تعدادی از پل‌های قوسی بنایی موجود در کشور پرداخته‌اند (Marefat et al., 2019; Marefat et al., 2004). از آنجا که به علت تعدد این پل‌ها و وجود محدودیت‌های میدانی دیگر، امکان انجام آزمایش‌های میدانی برای تمامی پل‌ها وجود ندارد، شبیه‌سازی عددی این سازه‌ها جهت ارزیابی رفتار آنها یک امر ضروری و ناگزیر است که در این مورد با استفاده از نتایج آزمایش‌های میدانی امکان مدل‌سازی عددی قابل اعتماد فراهم می‌آید. در سال‌های اخیر نیز جهت صحت‌سنجی روابط آیین‌نامه‌ای و مقایسه آن با نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی و عددی، پژوهش‌های گسترده‌ای انجام گرفته است (Gou et al., 2018). برخی از این پژوهش‌ها بر عدم کفایت روابط موجود در آیین‌نامه‌های طراحی بر اساس ضریب ضربه دلالت دارند (Hamidi & Danshjo, 2010). به عنوان نمونه ما و همکاران با انتخاب ۱۳ پل بتنی با دهانه‌های مختلف حداکثر ضریب ضربه ۱/۲۵ را محاسبه نمودند و به این نتیجه رسیدند که روابط موجود آیین‌نامه‌ها محافظه‌کارانه است (Ma et al., 2021). روابط آیین‌نامه‌ای محاسبه ضریب ضربه بار دینامیکی در بزرگراه‌ها فقط عواملی مانند اثرات چکشی ناشی از ناپوستگی‌های سطح مسیر، اعوجاج در روسازی مسیر و تغییر سطح ناشی از نشست در سطح مسیر را در نظر می‌گیرند که استفاده از آنها برای پل‌های راه‌آهن درست نیست (American Association of State & Transportation, 2010). اما روابط ضریب بزرگنمایی دینامیکی پل‌های قدیمی راه‌آهن نه تنها سعی در اعمال تأثیرات ناشی از تغییرشکل چرخ‌ها و بی‌نظمی‌های مسیر دارند، بلکه اثرات تقویت شده ناشی از لرزش وسیله نقلیه را نیز در نظر می‌گیرند (Arema, 2013). اساساً نوسان پل تحت تأثیر حرکت بارهای ترافیکی باید برای تأمین دو هدف اساسی محدود شود. اولین هدف کنترل نسبت تنش‌های ناشی از بار دینامیکی به تنش‌های ناشی از بار استاتیکی است. هدف دوم کنترل نوسانات محسوس است؛ گرچه این نوسانات فاقد اثرات خطرناک بر سازه است، اما لرزش بیش از حد ممکن است اطمینان کاربران را به سازه مورد استفاده تضعیف نماید (Biggs, 1964).

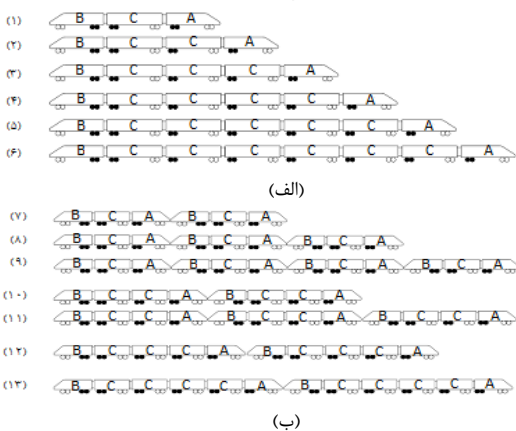
با سرعت ۲۱۰ کیلومتر بر ساعت آغاز به کار کرد. اولین قطار پرسرعت در اروپا نیز قطار پرسرعت فرانسه بود که در سال ۱۹۸۳ و با سرعت ۲۷۰ کیلومتر بر ساعت مورد بهره‌برداری قرار گرفت (Delgado, 2008). با توجه به پیچیدگی‌های مربوط به شبیه‌سازی قطارهای پرسرعت از آن زمان تاکنون پژوهش‌های بسیاری انجام شده است که از میان پژوهش‌های انجام شده می‌توان به مطالعه کوآرک و همکاران درباره قطارهای پرسرعت در کره جنوبی اشاره نمود. نتایج آنها نشان می‌دهد که حداکثر خیز در پل‌های عرشه‌ای بتنی توسط لوکوموتیوهایی که سنگین‌تر از واگن‌های مسافری هستند رخ می‌دهد و بار مسافران بر میزان حداکثر خیز در این پل‌ها تأثیر ندارد (Kwark et al., 2004). در مطالعه دیگری که توسط گالوین و همکاران صورت گرفته است، پاسخ دینامیکی نوع مشخصی از پل راه‌آهن پرسرعت متداول در مجموعه راه‌آهن اسپانیا با هدف بررسی نوسان قائم، ارزیابی شده است. از آنجا که هدف این مقاله مطالعه پاسخ پل بوده است، جهت مدل‌سازی قطار روی پل از مدل بار متمرکز متحرک استفاده شده است. نتایج آنها حاکی از دقت مدل عددی اجزای محدود در پیش‌بینی پاسخ پل و ارزیابی حالت حدی بهره‌برداری شتاب قائم در خطوط راه‌آهن دارای بالاست است (Galvín et al., 2018). بررسی رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت نیز اخیراً توسط یزدانی و عظیمی انجام شده است (Azimi & Yazdani, 2021; Yazdani & Azimi, 2020). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هندسه قطارهای پرسرعت تأثیر به‌سزایی در رفتار پل‌های قوسی بنایی دارند و رفتار این پل‌ها برای قطارهایی با حداکثر سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت مناسب است.

روش متداول تحلیل پل‌های قدیمی راه‌آهن تحت اثر عبور قطار، استفاده از ضریب ضربه است که توسط آیین‌نامه پل‌های راه‌آهن آمریکا (Arema, 2013) و آیین‌نامه اروپا (۲-۲۰۰۳) تعریف شده است. در این استانداردها جهت بررسی رفتار پل‌ها، پاسخ پل‌ها تحت بارگذاری دینامیکی توسط ضریب بزرگنمایی دینامیکی بیان می‌شود و جهت بررسی آسایش مسافران از پارامتر شتاب عمودی وسیله نقلیه استفاده می‌شود. ضریب بزرگنمایی دینامیکی که تفاوت پاسخ دینامیکی پل نسبت به پاسخ استاتیکی متناظر آن تحت بار متحرک است، بیان‌کننده اثر بار دینامیکی قطار بر روی پل

تحت بار استاتیکی، تحت بار دینامیکی عبور دیزل و همچنین فرکانس سه مود اول پل‌ها به عنوان معیار کالیبراسیون انتخاب شده‌اند. در ادامه برای تحلیل دینامیکی پل‌ها و بررسی پاسخ پل‌ها به حرکت قطار پرسرعت پردیس در هندسه‌های مختلف از ۵۲ تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها برای محاسبه ضریب ضربه به کار گرفته شده است که در ادامه مقاله روابط مختلف محاسبه ضریب ضربه بر اساس آیین‌نامه‌های مختلف بیان شده است.

۲- معرفی قطار پرسرعت پردیس

در پژوهش حاضر از قطار پردیس به عنوان اولین قطار پرسرعت ایران استفاده شده است تا رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت با استفاده از پارامتر ضریب ضربه مورد ارزیابی قرار گیرد. ذکر این نکته ضروری است که دلیل آمدن نام تجاری قطار پردیس در این مطالعه صرفاً استفاده از مشخصات یکی از قطارهای پرسرعت داخلی بوده و با وجود آنکه ساختار و وزن و پیکربندی متمایزی مد نظر نویسندگان مقاله نیست، انواع مختلف هندسه‌های این قطار می‌تواند در نتیجه‌گیری بهتر موثر واقع شود. برای انجام یک مطالعه جامع هندسه‌های مختلف قطار پردیس که در مجموع ۱۳ هندسه مختلف است در نظر گرفته است. هندسه‌های قطار پرسرعت پردیس مطابق کاتالوگ آن به صورت تک و چندگانه مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین در شکل ۱، هندسه یک واگن از قطار پردیس جهت ارزیابی دینامیکی آن نشان داده شده است و مشخصات واگن‌ها شامل بار محورها و فاصله واگن‌ها در جدول ۱ درج شده‌اند.



شکل ۱. هندسه انواع قطار پرسرعت پردیس، (الف) هندسه تک و (ب) هندسه چندگانه

اخیراً مطالعات مربوط به ضریب ضربه در پل‌های قوسی بنایی راه‌آهن در ایران صورت گرفته است و در مطالعه‌ی میدانی که در مرجع (Ataei & Miri, 2018) به آن اشاره شده است، ۱۱ پل تحت اثر حرکت قطارهایی با حداکثر سرعت ۷۵ کیلومتر بر ساعت مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس این پژوهش، سرعت حرکت قطار و طول دهانه پل با ضریب ضربه پل‌ها رابطه واضحی نداشته و طول قطار تاثیر جزئی بر ضریب بزرگنمایی دینامیکی پل‌ها داشته است. به طور کلی در پژوهش‌های فراوانی پارامترهای موثر بر پاسخ دینامیکی انواع مختلف پل‌های راه‌آهن و مقدار ضریب ضربه در آنها مورد بررسی قرار گرفته است که از میان آنها می‌توان به مراجع (Au et al., 2002; Zhang et al., 2003) اشاره نمود. بر اساس نتایج مرجع (Hamidi & Danshjo, 2010) پارامترهایی مانند سرعت حرکت قطار و نسبت فاصله محورها به طول دهانه پل با مقادیر ضریب ضربه مرتبط هستند، بطوریکه مقدار این ضریب با سرعت حرکت قطار رابطه مستقیم و با نسبت فاصله محورها به طول دهانه پل رابطه عکس دارد. به طور مشابه بر روی خطوط راه‌آهن پرسرعت نیز پژوهش‌های مشابهی انجام گرفته است که بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر ضریب ضربه با وزن کل قطار نسبت عکس داشته است (Yoon et al., 2013). تا کنون مطالعه‌ای روی ضریب ضربه پل‌های قوسی بنایی راه‌آهن تحت اثر قطار پرسرعت صورت پذیرفته است. از این رو هدف از مقاله حاضر محاسبه ضریب ضربه پل‌های قوسی بنایی برای قطار پرسرعت پردیس با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی است. امید است مقایسه نتایج روش ضرایب بزرگنمایی دینامیکی با روش‌های عددی در تحلیل دینامیکی پل‌های قوسی بنایی راه‌آهن بتواند گام مناسبی در جهت تصمیم‌گیری در مورد این زیرساخت‌های ریلی کشور باشد.

در ادامه این مطالعه جهت استفاده از یک نمونه قطار پرسرعت مورد استفاده در داخل کشور، مشخصات کلی و هندسی این قطار ارائه شده است. در گام بعد با استفاده از دو پل قوسی بتنی غیرمسلح واقع در کیلومتر ۲۳ و ۲۴ راه‌آهن قدیم تهران- قم و با توجه به اطلاعات موجود از آنها، دو مدل اجزای محدود مطابق مشخصات هندسی آنها تهیه شده است. جهت به‌هنگام‌سازی مدل‌های عددی، جابجایی کلید قوس دهانه سمت چپ پل کیلومتر ۲۳ و دهانه میانی پل کیلومتر ۲۴

بزرگی ایجاد کند. مقادیر مربوط به فواصل میان واگن‌ها نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات واگن‌های موجود در قطار پردیس

Trainset Iran DH4-1 PARADISE, Project: "
(Y.5213-12 / F.0532," 2005

پارامتر	واحد	واگن A	واگن B	واگن C
بار هر محور	کیلونیوتن	۱۹۷/۸	۱۹۸/۵	۱۹۷/۹
طول واگن (L_v)	متر	۲۱/۳	۲۱/۳	۲۱/۳
فاصله دو بوژی (L_b)	متر	۱۸/۷	۱۸/۷	۱۸/۷
فاصله دو چرخ یک بوژی (L_w)	متر	۲/۶	۲/۶	۲/۶
فاصله نزدیک‌ترین محوره‌های دو بوژی مجاور	متر	۱۶/۱	۱۶/۱	۱۶/۱

جدول ۳. فاصله واگن‌های مختلف در قطار پردیس

پارامتر	واحد	B-C	C-C	C-A	A-B
فاصله واگن‌ها	متر	۵/۵	۵/۴	۵/۵	۵/۷

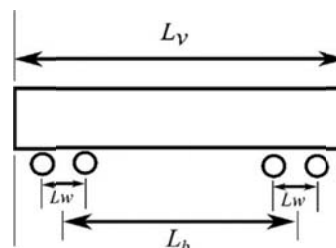
۳- مدل‌سازی عددی

همان‌طور که پیشتر اشاره شد به دلیل پیچیدگی‌های موجود در پل‌های قوسی بنایی، شبیه‌سازی عددی آنها جهت ارزیابی رفتار آنها یک امر ضروری و ناگزیر است. از میان روش‌های عددی دو روش اجزای مجزا و اجزای محدود در مقیاس‌های ریزمدلسازی و درشت مدلسازی به صورت گسترده‌ای در شبیه‌سازی پل‌های قوسی بنایی استفاده شده است. برای این منظور در پژوهش حاضر از روش اجزای محدود و رویکرد درشت مدلسازی به عنوان یک روش کارا جهت تهیه مدل عددی استفاده می‌شود. مدلسازی صورت گرفته شامل دو بخش بوده است که در آن مدلسازی پل‌ها به روش اجزای محدود و مدلسازی قطار روی پل‌ها به روش بار متحرک در نظر گرفته شده است. به طور کلی مدلسازی قطار بر روی پل با استفاده از سه روش بار متمرکز، جرم متمرکز و اندرکنش قطار و پل انجام می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات متعدد نشان می‌دهد که افزایش جزئیات مدلسازی وسیله نقلیه صرفاً در افزایش دقت محاسبه پاسخ‌های وسیله نقلیه مؤثر است و در پاسخ‌های پل تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد. از جمله این

جدول ۱. مشخصات کلی قطار پرسرعت پردیس با هندسه‌های

Trainset Iran DH4-1 PARADISE, "
مختلف (Project: Y.5213-12 / F.0532," 2005

شماره قطار	تعداد محورها	وزن قطار (کیلونیوتن)	طول قطار (متر)
۱	۱۲	۲۳۷/۸	۸۹/۳
۲	۱۶	۳۱۶/۴	۱۲۰/۸
۳	۲۰	۳۹۶۰	۱۵۲/۳
۴	۲۴	۴۷۵۱/۶	۱۸۳/۸
۵	۲۸	۵۵۴۳/۲	۲۱۵/۳
۶	۳۲	۶۳۳۴/۸	۲۴۶/۸
۷	۲۴	۴۷۵۳/۶	۱۸۴/۳
۸	۳۶	۷۱۳۰/۴	۲۷۹/۳
۹	۴۸	۹۵۰۷/۲	۳۷۴/۳
۱۰	۳۲	۶۳۳۶/۸	۲۴۷/۳
۱۱	۴۸	۹۵۰۵/۲	۳۷۳/۸
۱۲	۴۰	۷۹۲۰	۳۱۰/۳
۱۳	۴۸	۹۵۰۳/۲	۳۷۳/۳



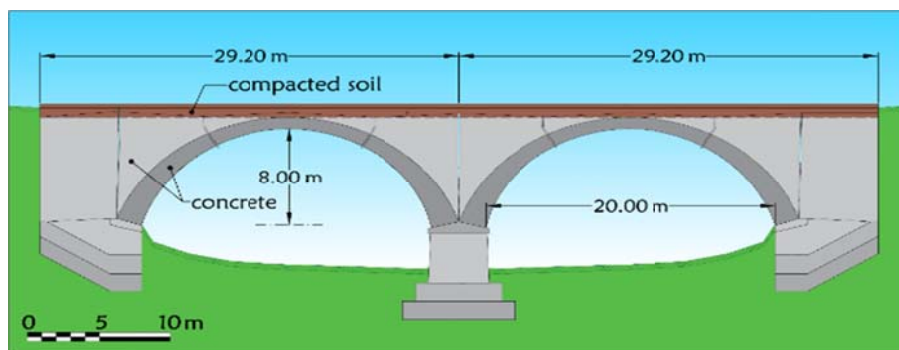
شکل ۲. هندسه یک واگن قطار پردیس، L_v طول یک واگن، L_b فاصله دو بوژی، L_w فاصله دو چرخ یک بوژی ("**Trainset Iran DH4-1 PARADISE, Project: Y.5213-12 / (F.0532," 2005**

لازم به ذکر است که واگن‌های A و B به ترتیب به عنوان لوکوموتیوهای ابتدا و انتهای قطار و واگن‌های C به عنوان واگن‌های مسافری در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین در قطارهای چندگانه معرفی شده، اتصال از طریق واگن‌های A و B صورت خواهد گرفت. همچنین تمامی واگن‌ها ابعاد کاملاً یکسانی با یکدیگر داشته و تنها تفاوت آنها در بار محورها و فاصله میان واگن‌ها بوده است. هدف از ارائه جدول ۲ نمایش تغییرات بار محوری در واگن‌های سه گانه است که با وجود یکسان بودن هندسه واگن‌ها می‌تواند در بار کل واگن تغییرات

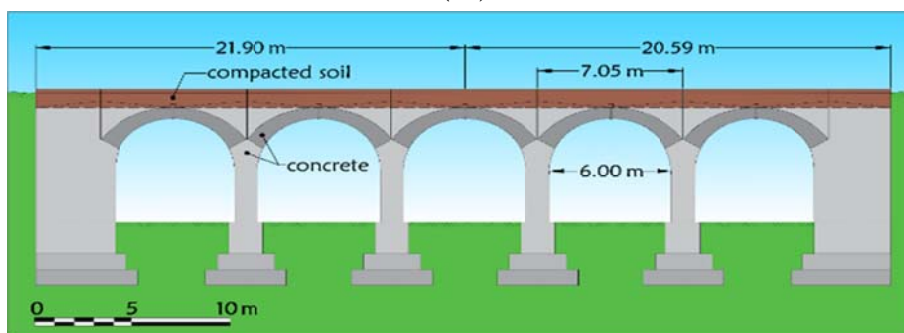
در این مطالعه، اجزای مختلف سازه شامل قوس‌ها، پایه‌ها، کوله‌ها و دیوارهای جانبی مطابق با وضعیت موجود پل با رعایت جزئیات، شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین با توجه به رفتار درون صفحه‌ای پل‌های قوسی بنایی تحت اثر بار قائم، از تحلیل کرنش مسطح در فرایند شبیه‌سازی استفاده شده است. پل‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر دو پل قدیمی هستند که مشخصات هندسی آنها در شکل ۳ و جدول ۴ ارائه شده است. در ساخت این پل‌ها از آرماتور استفاده نشده است و تمامی بخش‌ها شامل قوس‌ها، دیوارهای جانبی، کوله‌ها، پایه‌ها و شالوده از بتن غیرمسلح ساخته شده‌اند و بیش از ۸۰ سال از ساخت آنها می‌گذرد. در نهایت مطابق شکل ۴ مدل اجزای محدود پل‌ها تهیه شده است. در مدل عددی حاضر از المان‌های چهار گرهی و مرتبه بالای هشت گرهی در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است و در مجموع مدل اجزا محدود از ۷۵۰۵ المان و ۱۶۱۲۹ گره (معادل ۳۲۲۵۸ درجه آزادی) برای پل دو دهانه و از ۸۰۴۰ المان و ۱۶۶۷۴ گره (معادل ۳۳۳۴۸ درجه آزادی) برای پل پنج دهانه تشکیل شده است.

موارد می‌توان به مطالعه‌ای که به تازگی بر روی رفتار دینامیکی پل‌های قوسی بنایی صورت گرفته است اشاره کرد (Forgács et al., 2020). بنابراین از آنجا که در مطالعه حاضر، هدف بررسی پاسخ پل به عنوان سازه مسئله است. استفاده از جزئیات کمتر جهت شبیه‌سازی وسیله نقلیه نه تنها دقت نتایج را کاهش نمی‌دهد بلکه منجر به کاهش محاسبات نیز می‌شود. بر این اساس در پژوهش حاضر، از مدل بار متحرک جهت شبیه‌سازی بار قطار روی پل‌ها استفاده شده است.

رفتار واقعی پل‌های قوسی بنایی به شرایط گیرداری تکیه‌گاه‌ها، خواص واقعی مصالح، تغییر خواص در مقاطع مختلف، اثر تغییر درجه حرارت، اثر خستگی، اندازه و موقعیت ترک‌ها و غیره بستگی دارد. همچنین لازم است که اثر مصالح پرکننده مد نظر قرار گیرد و لازم به ذکر است که با توجه به هدف مقاله حاضر مبنی بر مطالعه رفتار سازه‌ای پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت داخلی، از بررسی اندرکنش خاک و پی و اثر خاک بر شالوده پل، بررسی نوع انتقال بار از ریل و تراورس به پل و نیز تمرکز بر طراحی ریل و تراورس روی پل در این مقاله صرف‌نظر شده است.



(الف)

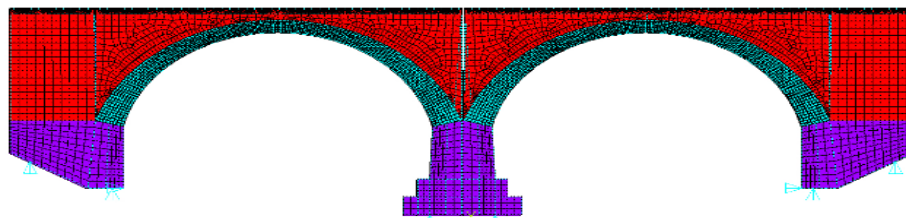


(ب)

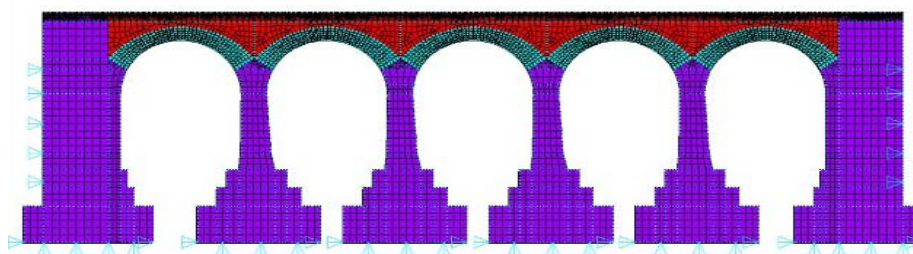
شکل ۳. مشخصات هندسی پل‌های مورد مطالعه (الف) پل دو دهانه، (ب) پل پنج دهانه

جدول ۴. مشخصات هندسی پل‌های مورد مطالعه

پل	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	شکل قوس	ضخامت کلید (متر)	ضخامت پاتاق (متر)	عرض قوس (متر)	ارتفاع پل (متر)	ضخامت دیوار جانبی (متر)
دو دهانه	۲	۲۰	قسمتی از دایره	۱	۱/۹	۳/۹	۱۲	۱
پنج دهانه	۵	۶	نیم دایره	۰/۷	۱/۱	۳/۹	۸	۱



(الف)



(ب)

شکل ۴. مدل اجزای محدود و شرایط مرزی پل‌ها (الف) پل دو دهانه، (ب) پل پنج دهانه

لازم به ذکر است برای محاسبه مقاومت کششی مصالح برحسب مقاومت فشاری آنها از رابطه $f_t' = 0.56\sqrt{f_c'}$ استفاده شده است و همه مشخصات غیرخطی آنها براساس این فرض بدست آمده است.

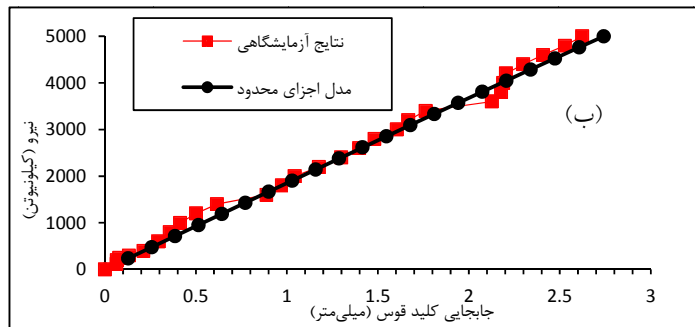
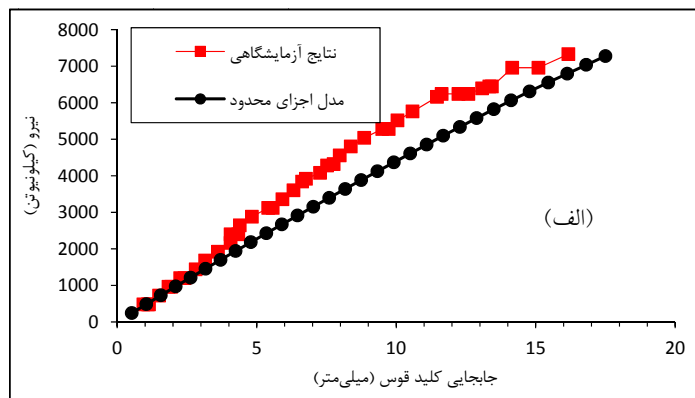
در فرایند شبیه‌سازی پل، رفتار مصالح غیرخطی فرض شده است و از مدل الاستو-پلاستیک با معیار تسلیم دراکر-پراگر جهت پیش‌بینی خرابی‌های محتمل استفاده شده است. برای این منظور مشخصات مکانیکی مصالح مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. مشخصات مکانیکی اعضای مختلف پل‌ها

عنوان	وزن مخصوص		ضریب چسبندگی (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (کیلو پاسکال)		زاویه اصطکاک (درجه)
	کیلومتر بر متر مکعب	کیلومتر بر متر مکعب			دو دهانه	پنج دهانه	
پل مورد مطالعه	دو دهانه	پنج دهانه	دو دهانه	پنج دهانه	دو دهانه	پنج دهانه	پنج دهانه
قوس	۲۲۸۰	۲۲۹۰	۳/۳۷	۰/۱۷	۰/۲۱	۲۴/۹	۵۳
پایه	۲۳۵۰	۲۲۵۰	۵/۱	۰/۱۸	۰/۱۹	۳۶/۵	۵۱/۲
پرکننده	۲۳۰۰	۲۲۱۷	۱/۷۵	۰/۲۹	۰/۲۵	۱۰/۹	۳۶/۵

استاتیکی غیرخطی حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. در گام دوم صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده، با استفاده از تحلیل مودال سه فرکانس اصلی مدل عددی محاسبه شده و در جدول ۶ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

در ادامه جهت صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده، تحلیل استاتیکی، تحلیل مودال و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شده است و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی موجود در پل‌ها مقایسه شده است. در شکل ۵ نتایج حاصل از تحلیل



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایش استاتیکی و شبیه‌سازی عددی (الف) پل دو دهانه، (ب) پل پنج دهانه

جدول ۶. فرکانس سه مود اول پل‌های مورد مطالعه

مود سوم		مود دوم		مود اول		فرکانس
پنج دهانه	دو دهانه	پنج دهانه	دو دهانه	پنج دهانه	دو دهانه	پل مورد مطالعه
۲۶/۴	۱۰/۸۳	۲۱/۵	۷/۹۱	۱۴/۶	۴/۴۸	نتایج آزمایشگاهی
۲۸/۳۸	۱۰/۵۶	۲۲/۳۶	۸/۸۴	۱۵/۴۲	۴/۱۱	مدل اجزای محدود
۸/۳	۲/۶	۴	۱۰/۶	۵/۶	۹	خطا (%)

مدل عددی در پل دو دهانه و پنج دهانه به ترتیب برابر با ۸ و ۱/۵ درصد است. همچنین مطابق نتایج به دست آمده از جدول ۶، میانگین خطای موجود بین تحلیل مودال مدل عددی در پل دو دهانه و پنج دهانه به ترتیب برابر با ۷/۴ و ۵/۹ درصد است. در نهایت جهت انجام صحت‌سنجی نهایی، دیزل شش محوره مطابق شکل ۵ بر روی پل دو دهانه با

همان‌طور که مشخص است، نتایج عددی از دقت مناسبی برخوردار هستند. برای رسیدن به دقت مورد نظر در نتایج عددی پل‌های مدل‌سازی شده، در هر مرحله با اعمال تغییرات در شرایط مرزی مقدار خطا را کاهش داده و در نهایت دقت مدل‌های عددی به حد مطلوبی رسیده است. مطابق نتایج به دست آمده از شکل ۵، خطای موجود در تحلیل استاتیکی

میرایی، M ماتریس جرم، K ماتریس سختی، ξ درصد میرایی سازه، ω_1 فرکانس مود اول سازه، ω_n فرکانس مودی از سازه (مود n ام) که تا آن مود حداقل ۷۵ درصد جرم سازه مشارکت داشته باشد و خود آن مود هم به تنهایی ۵ درصد مشارکت جرمی داشته باشد، هستند.

سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت و برای پل پنج دهانه با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت با استفاده از تحلیل دینامیکی عبور داده شده است. جهت تحلیل دینامیکی مدل عددی از روش تحلیل تاریخیچه زمانی همراه با روش میرایی رایلی به منظور اعمال درصد میرایی استفاده شده است. در روش رایلی، ماتریس میرایی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. همچنین α و β ضرایب

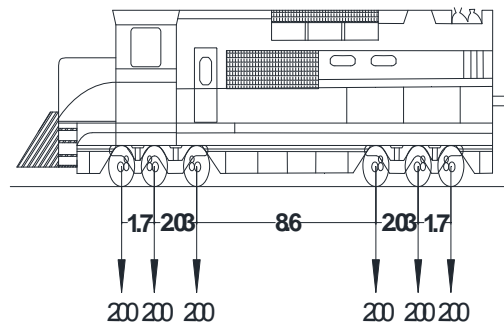
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_1 \omega_n}{\omega_1 + \omega_n} \quad (2)$$

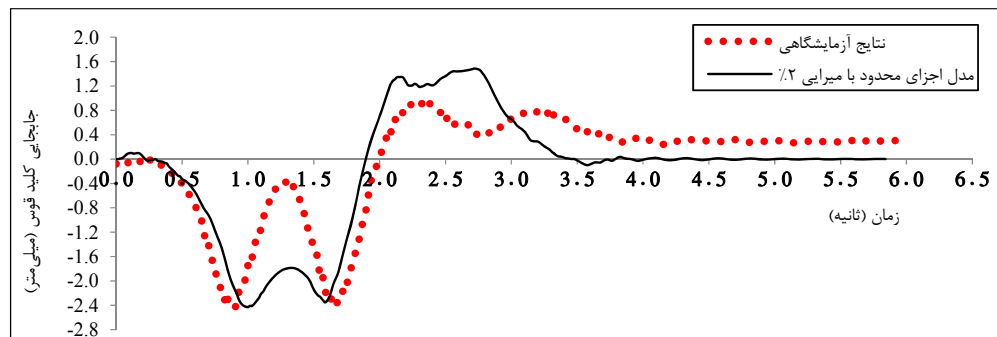
$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_n} \quad (3)$$

می‌یابد (Bayraktar et al., 2010). بنابراین برای پل دو دهانه میرایی ۲ درصد و برای پل پنج دهانه میرایی ۵ درصد فرض شده است تا مقادیر جابجایی حداکثر در مدل عددی و آزمایش یکسان شود. مطابق نتایج به دست آمده از مدل عددی می‌توان استنباط کرد که مدل عددی مذکور با موفقیت مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و می‌توان نتیجه گرفت که مدل اجزای محدود ارائه شده، قابلیت نمایش سایر مشخصات دینامیکی سازه را دارد.

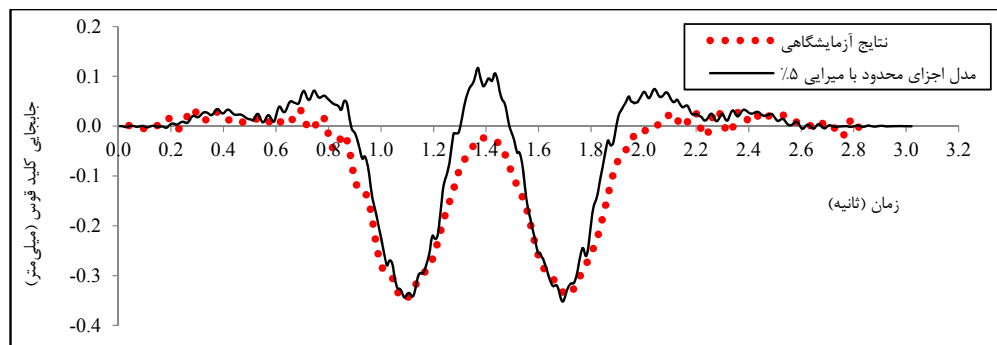
در نهایت با استفاده از روش نیومارک - بتا، تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی انجام شد و نتایج آن در شکل ۷ ارائه شده است، مطابق نتایج به دست آمده در شکل ۷، خطای موجود بین پاسخ حداکثر مدل عددی و آزمایش عبور دیزل در پل دو دهانه برابر با ۱ درصد و در پل پنج دهانه برابر با ۱/۴ درصد است. لازم به ذکر است در منابع متعددی گزارش شده است که میرایی پل‌های قوسی بنایی در حدود ۱ تا ۱۰ درصد است که در آن با افزایش طول دهانه میزان میرایی نیز کاهش



شکل ۶. بار متحرک دیزل شش محوره



(الف)



(ب)

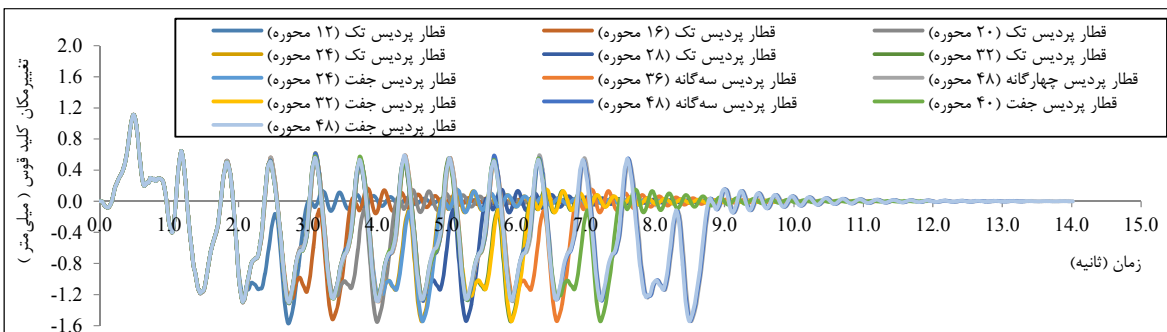
شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایش عبور دیزل و شبیه‌سازی عددی (الف) پل دو دهانه تحت سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت، (ب) پل پنج دهانه تحت سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت

۴- تحلیل دینامیکی پل‌ها تحت اثر قطار پرسرعت

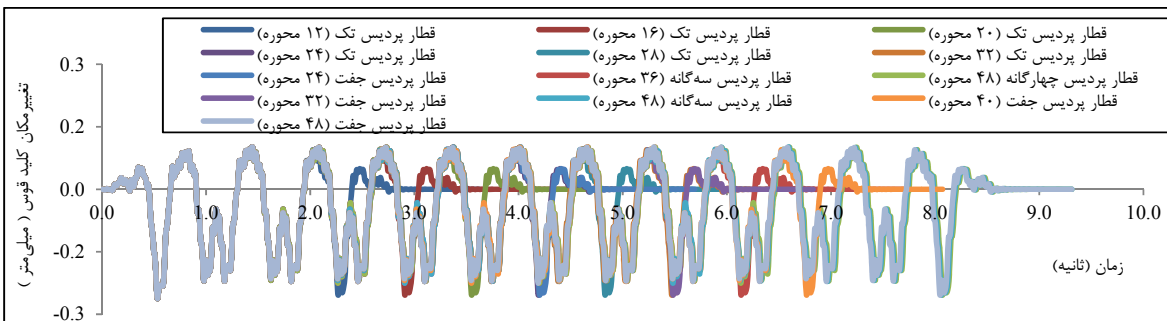
بنابراین، در مجموع ۵۲ تحلیل تاریخچه زمانی انجام شده است که سهم هر کدام از پل‌ها ۲۶ تحلیل بوده است (برای هر پل ۱۳ تحلیل دینامیکی در سرعت ۱۵۰ کیلومتر ساعت و ۱۳ تحلیل شبه استاتیکی در سرعت ۱ کیلومتر بر ساعت به ازای هندسه‌های مختلف از قطار پردیس). تعداد تحلیل‌های صورت گرفته با توجه به موارد مشابه در سایر مطالعات که پیش‌تر مورد اشاره قرار گرفته‌اند، در حد مطلوبی ارزیابی می‌شوند (Ataei & Miri, 2018).

باتوجه به مش در نظر گرفته شده در مجموع برای پل دو دهانه و پنج دهانه به ترتیب از ۵۸۴ و ۴۳۱ گام زمانی در تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی پاسخ جابجایی در سرعت‌های ۱۵۰ و ۱ کیلومتر بر ساعت در شکل ۸ و شکل ۹ نمایش داده شده است.

جهت تحلیل دینامیکی پل‌های قوسی بنایی تحت اثر عبور قطار پرسرعت، قطار پردیس به عنوان نیروی متحرک تلقی شده و به دلیل کوچک بودن جرم قطار نسبت به پل‌ها از اثر اینرسی جرم قطار صرف‌نظر شده است. بنابراین محورهای قطار به صورت نیروهای متمرکز متحرک با فاصله مشخص و با سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت از روی پل‌ها عبور داده شده‌اند. علاوه بر این، جهت محاسبه پاسخ استاتیکی پل‌ها بایستی از حرکت قطار با سرعت کمتر از ۱۰ کیلومتر بر ساعت استفاده شود. بنابراین در مطالعه حاضر علاوه بر سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت به صورت تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی، قطارهای پردیس با سرعت ۱ کیلومتر بر ساعت به صورت تحلیل تاریخچه زمانی شبه استاتیکی از روی پل‌ها عبور داده شده‌اند و نتایج آن بعنوان نتایج تحلیل استاتیکی پل‌ها فرض شده است (Ataei & Miri, 2018).

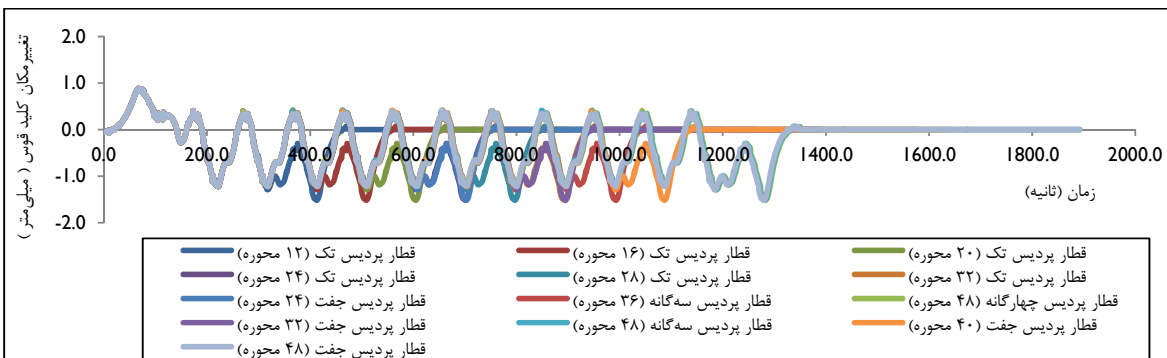


(الف)

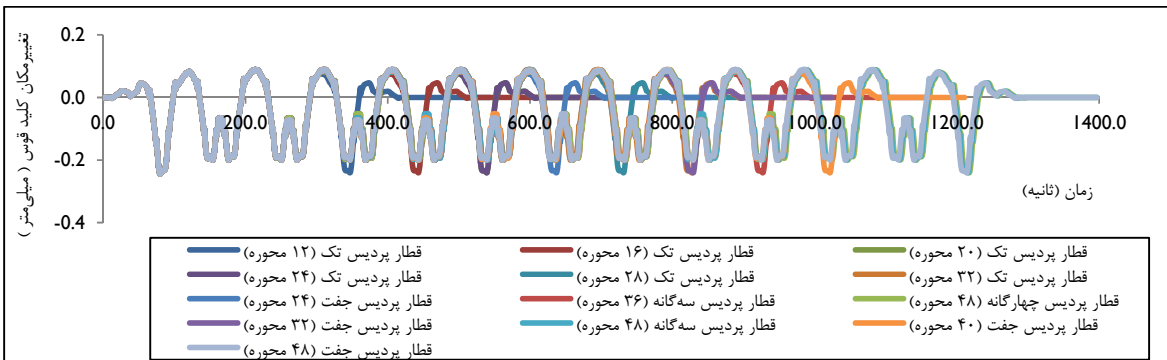


(ب)

شکل ۸. تغییر مکان کلید قوس در سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت (الف) پل دو دهانه (ب) پل پنج دهانه



(الف)



(ب)

شکل ۹. تغییر مکان کلید قوس در سرعت یک کیلومتر بر ساعت (الف) پل دو دهانه (ب) پل پنج دهانه

۵- محاسبه ضریب ضربه

آمده در پل، مطابقت خوبی با یکدیگر دارند (Kwasniewski et al., 2006). بنابراین مقدار ضریب ضربه (IM) یا همان مفهوم ضریب بزرگنمایی دینامیکی (DAF) برای هر پل را می‌توان بر اساس مقادیر پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی (کرنش یا خیز) محاسبه نمود. در نهایت در مطالعه حاضر با توجه به تحلیل‌های دینامیکی صورت گرفته، پارامتر ضریب ضربه بر اساس مقادیر بیشینه خیز در کلید قوس تحت بار دینامیکی D_{dyn} و استاتیکی D_{sta} و به کمک پارامتر بار دینامیکی مجاز (DLA) مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Moghimy & Ronagh, 2008):

$$DLA = \frac{D_{dyn} - D_{sta}}{D_{sta}} \quad \text{or} \quad DLA + 1 = \frac{D_{dyn}}{D_{sta}} = IM \quad (4)$$

در ابتدا روابط مربوط به پل‌های بزرگراهی در آیین‌نامه‌های آمریکا، ایران، کانادا و برخی از کشورهای اروپایی بررسی شده و سپس به بحث درباره روابط مربوط به پل‌های راه‌آهن در آیین‌نامه‌های آمریکا و اروپا پرداخته شده است.

برای مثال آیین‌نامه آشتو برای بار دینامیکی مجاز در پل‌های بزرگراهی رابطه (۵) را پیشنهاد داده است (American Association of State & Transportation, 2010):

$$DLA = \frac{15.24}{L + 38.1} \leq 30\% \quad (5)$$

در آیین‌نامه کشورهای ایران (نشریه ۱۳۹) و آلمان (DIN) نیز روابط (۶) و (۷) برای بار دینامیکی مجاز در پل‌های بزرگراهی بر اساس طول دهانه پل (L) و ارتفاع خاکریز روی پل (h) (هر دو بر حسب متر) ارایه شده است:

$$DLA = 0.3 - 0.005L - 0.15h, \quad h \geq 0, \quad L < 12.5 \quad \text{or} \quad L > 50 \quad (6)$$

$$DLA = 0.4 - 0.008L - 0.1h, \quad h \geq 0, \quad 12.5 \leq L \leq 50 \quad (7)$$

بر طبق آیین‌نامه کشور آلمان برابر با ۰٫۳ است که این مقدار در آیین‌نامه ایران نیز مورد تأیید است در حالی‌که حداکثر مقدار این پارامتر در آیین‌نامه کشور ژاپن ۰٫۴ در نظر گرفته شده است (O'Connor, 2000). عامل تعیین‌کننده در برخی دیگر

در طراحی پل‌ها به روش ضریب ضربه برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی ناشی از بار وسیله نقلیه، بار ترافیکی به عنوان یک بار استاتیکی لحاظ شده و با اعمال ضریب ضربه افزایش داده می‌شود. این روش بر روی انواع مختلف پل‌ها شامل پل‌های موجود در بزرگراه‌ها و نیز انواع پل‌های موجود در شبکه‌های راه‌آهن مورد استفاده قرار گرفته است. در کشورهای مختلف با توجه به سطح اهمیت پل‌های موجود، مفهوم ضریب ضربه وارد آیین‌نامه‌ها شده که در ادامه این مطالعه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که ضرایب ضربه محاسبه شده بر اساس خیز و کرنش به وجود

آیین‌نامه‌های مختلف روابط متعددی را جهت محاسبه بار دینامیکی مجاز معرفی نموده‌اند که به کمک آن‌ها، پارامتر ضریب ضربه قابل محاسبه است (Arema, 2013).

در ادامه این پژوهش روابط مربوط به آیین‌نامه‌های مختلف در دو دسته بندی کلی پل‌های بزرگراهی و پل‌های راه‌آهن ارائه شده است.

آیین‌نامه آشتو بر اساس رابطه (۵) برای طراحی پل‌ها، تنها طول دهانه پل (L) بر حسب متر را به عنوان شاخص تأثیرگذار بر پاسخ دینامیکی پل‌ها معرفی کرده است.

در آیین‌نامه آلمان در مواردی که طول دهانه پل کمتر از ۱۲٫۵ متر است مقدار بار دینامیکی مجاز برابر با ۰٫۳ و در مواردی که طول دهانه بیش از ۵۰ متر است مقدار بار دینامیکی مجاز برابر با صفر فرض می‌شود. حداکثر مقدار این پارامتر

شامل آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف است که از جمله این موارد می‌توان به آیین‌نامه پل‌های راه‌آهن امریکا اشاره کرد که رابطه (۸) را برای بار دینامیکی مجاز در پل‌های فولادی راه‌آهن ارائه داده است (Arema, 2013):

$$DLA = \begin{cases} (40 - \frac{3L^2}{148.6}) / 100 & L \leq 24 \\ (16 + \frac{182.9}{L - 9.1}) / 100 & L \geq 24 \end{cases} \quad (8)$$

رویکرد دقیق مطابق رابطه (۹) مورد استفاده قرار گرفته است (۲۰۰۳، ۲-).

$$IM = \begin{cases} 1 + \varphi' + \varphi'' & \text{مسیرهای با نگهداری استاندارد} \\ 1 + \varphi' + 0.5\varphi'' & \text{مسیرهای با نگهداری دقیق} \end{cases} \quad (9)$$

مطابق ذیل قابل محاسبه است:

از آیین‌نامه‌های طراحی پل مانند آیین‌نامه کانادا (OHBD) در محاسبه بار دینامیکی مجاز پل‌های بزرگراهی، مقدار فرکانس مود اول ارتعاش پل بوده است (Moghimi & Ronagh, 2008). دسته دیگری که بعنوان آیین‌نامه‌های پل‌های راه‌آهن در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرند

در آیین‌نامه‌های دیگر نظیر آیین‌نامه پل‌های راه‌آهن اروپا نیز مقدار فرکانس مود اول ارتعاش پل در

که مقادیر φ' و φ'' از طریق روابط (۱۰) تا (۱۳)

$$\begin{cases} \varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4} & \text{for } K < 0.76 \\ \varphi' = 1.325 & \text{for } K \geq 0.76 \end{cases} \quad (10)$$

$$K = \frac{v}{2L\varphi \times n_0} \quad (11)$$

$$\varphi'' = \frac{\alpha}{100} \left[56e^{-\left(\frac{L\varphi}{10}\right)^2} + 50\left(\frac{L\varphi n_0}{80} - 1\right)e^{-\left(\frac{L\varphi}{20}\right)^2} \right] \quad (12)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{v}{22} & v \leq 22 (m / s) \\ \alpha = 1 & v > 22 (m / s) \end{cases} \quad (13)$$

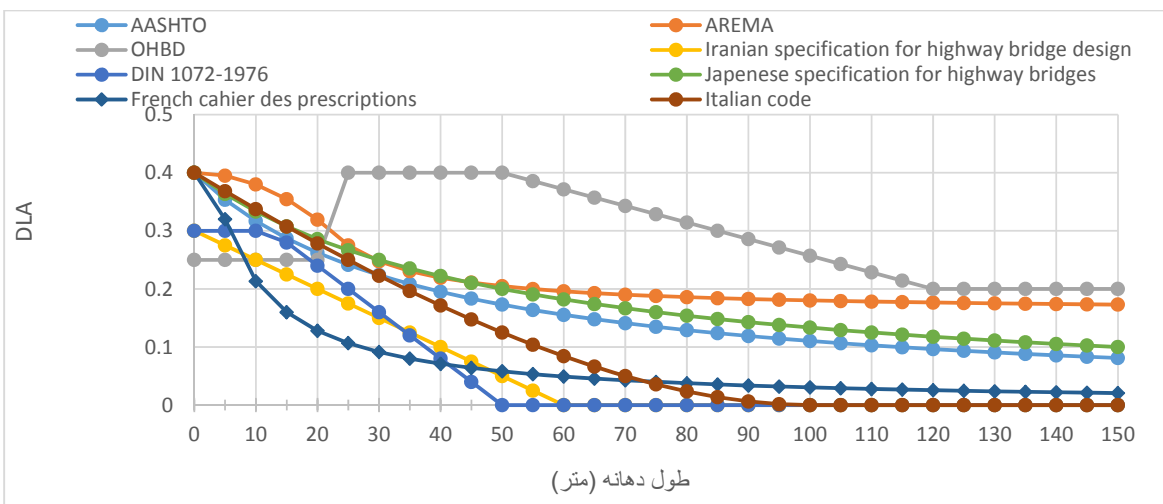
آیین‌نامه اروپا ضمن ارائه رابطه (۹) بعنوان رویکرد دقیق، رابطه (۱۴) را نیز بعنوان رویکرد ساده سازی شده بیان نموده است.

در روابط فوق v سرعت حرکت قطار، n_0 فرکانس مود اول ارتعاش طبیعی سازه، $L\varphi$ دو برابر طول موثر دهانه و α ضریب سرعت و برابر با واحد است.

$$IM = \begin{cases} \frac{2.16}{\sqrt{L-0.2}} + 0.73 & \text{مسیرهای با نگهداری استاندارد} \\ \frac{1.44}{\sqrt{L-0.2}} + 0.82 & \text{مسیرهای با نگهداری دقیق} \end{cases} \quad (14)$$

این مقادیر بر اساس طول دهانه پل، که از صفر تا ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است، محاسبه و ترسیم شده است.

برخی از ضرایب بار مجاز دینامیکی جهت مقایسه با یکدیگر در شکل ۱۰ و بر اساس روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف ترسیم شده‌اند.



شکل ۱۰. نمودار ضرایب بار دینامیکی مجاز بر طبق آیین‌نامه‌های مختلف

سرعت‌های بالا از آن جهت است که تنش، خیز و یا شتابهایی که به عنوان پاسخ سازه در اثر اینگونه بارهای دینامیکی به وجود می‌آید، نسبت به سرعت‌های پایین‌تر و یا حالت بارگذاری استاتیکی بیشتر است (YAZDANI & AZIMI, 2020). بنابراین این امکان وجود دارد که عملکرد پل‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی با سرعت بالا دچار مشکل شود. علاوه بر این، با توجه به این که بحث درباره تحلیل رفتار دینامیکی پل‌های قوسی بنایی راه‌آهن در هیچ یک از آیین‌نامه‌ها بطور دقیق مورد بررسی قرار نگرفته است، در پژوهش حاضر سعی بر این است تا با محاسبه ضرایب ضربه ارتباط بین این ضریب با پارامترهای دیگر از جمله طول پل، تعداد دهانه و طول قطار مورد بررسی قرار گیرد. در قدم دوم می‌توان خروجی‌های حاصل از روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها را با مقادیر بدست آمده از تحلیل حساسیت مقایسه نمود و امکان استفاده از روش ضریب ضربه را برای پل‌های قوسی بنایی راه‌آهن بعنوان روشی جایگزین مورد مطالعه قرار داد. مقادیر ضریب ضربه دو پل مورد نظر در اثر حرکت قطارهای پردیس بر طبق رابطه (۴)، در جدول ۸ ارائه شده است.

با مقایسه نمودارهای رسم شده در شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که برای پل‌های با دهانه‌های بیش از ۲۰ متر، آیین‌نامه کانادا مقادیر بیشتری را برای ضریب بار مجاز دینامیکی نسبت به سایر آیین‌نامه‌ها پیشنهاد می‌نماید. آیین‌نامه کانادا بر این اساس آیین‌نامه پل‌های راه‌آهن آمریکا در پل‌های با دهانه کمتر از ۲۰ متر محافظه کارانه‌تر از سایر آیین‌نامه‌ها عمل کرده و مقادیر بیشتری را ارائه می‌دهد. در این آیین‌نامه با توجه به نقش مهم فرکانس مود اول ارتعاش، ضریب بار دینامیکی مجاز برای پل‌هایی با فرکانس طبیعی مود اول کمتر از ۱ هرتز، بین ۲٫۵ تا ۴٫۵ هرتز و بیش از ۶ هرتز به ترتیب برابر با ۰٫۲، ۰٫۴ و ۰٫۲۵ است. این ضریب برای فرکانس‌های بین ۱ تا ۲٫۵ هرتز و ۴٫۵ تا ۶ هرتز بصورت خطی در حال تغییر است. روابط ضریب ضربه مورد استفاده در پل‌های راه‌آهن قدیمی یا پل‌های بزرگراهی را نمی‌توان برای پل‌های راه‌آهن پرسرعت مورد استفاده قرار داد. آیین‌نامه‌های راه‌آهن در کشورهای مختلف از جمله آیین‌نامه اروپا ضوابط خاصی را برای سرعت‌های بالا در خطوط ریلی گنجانده‌اند که تعدادی از آن‌ها در روابط (۹) تا (۱۴) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اهمیت

جدول ۷. ضریب ضربه پل‌های مورد مطالعه (دو دهانه و پنج دهانه) تحت اثر قطار پردیس

شماره قطار	تعداد محورها	وزن قطار (کیلو نیوتن)	طول قطار (متر)	ضریب ضربه (پل پنج دهانه)	ضریب ضربه (پل دو دهانه)
۱	۱۲	۲۳۷۶/۸	۸۹/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۳۷
۲	۱۶	۳۱۶۸/۴	۱۲۰/۸	۱/۰۷۳	۱/۰۰۲
۳	۲۰	۳۹۶۰	۱۵۲/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۲۴
۴	۲۴	۴۷۵۱/۶	۱۸۳/۸	۱/۰۷۳	۱/۰۱۸
۵	۲۸	۵۵۴۳/۲	۲۱۵/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۶
۶	۳۲	۶۳۳۴/۸	۲۴۶/۸	۱/۰۷۳	۱/۰۱۹
۷	۲۴	۴۷۵۳/۶	۱۸۴/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۹
۸	۳۶	۷۱۳۰/۴	۲۷۹/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۷
۹	۴۸	۹۵۰۷/۲	۳۷۴/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۷
۱۰	۳۲	۶۳۳۶/۸	۲۴۷/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۸
۱۱	۴۸	۹۵۰۵/۲	۳۷۳/۸	۱/۰۷۳	۱/۰۱۷
۱۲	۴۰	۷۹۲۰	۳۱۰/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۹
۱۳	۴۸	۹۵۰۳/۲	۳۷۳/۳	۱/۰۷۳	۱/۰۱۷

۶- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت قطارهای پرسرعت در صنعت ریلی هر کشور، بیشتر کشورهای توسعه یافته دارای شبکه راه آهن پرسرعت هستند و برای این منظور وجود این قطارها در کشور ایران نیز ضروری به نظر می‌رسد. به علت محدودیت‌های میدانی، زمانی و اقتصادی، حذف پل‌های قوسی بنایی در شبکه راه آهن کشور غیرممکن است، بنابراین ارزیابی دینامیکی رفتار این پل‌ها تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت یک امر ضروری و حیاتی است. مطالعات تحلیلی، عددی و میدانی حاکی از آن است که رفتار این پل‌ها در برابر بارهای قائم استاتیکی و دینامیکی (قطارهای با سرعت پایین) مناسب است و نیاز به مطالعات بیشتری در مورد قطارهای پرسرعت دارد. در کشور ایران تنها قطار پرسرعت مربوط به قطار پردیس است که دارای سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت است.

بنابراین در مطالعه حاضر با عنایت به تحقیقات میدانی گذشته، یک مدل عددی دقیق با استفاده از روش اجزا محدود برای دو پل قوسی بنایی سال‌خورده تهیه شد و مدل‌های عددی تهیه شده در سه مرحله به صورت کامل مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند. پس از اطمینان از مدل عددی تهیه شده، ۱۳ مدل هندسی مختلف با طول کوتاه و بلند از قطار پردیس تهیه شد و با انجام ۲۶ تحلیل دینامیکی غیرخطی برای هر پل، در مجموع ۵۲ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شد و با استفاده از تحلیل حساسیت ضریب ضربه پل‌ها استخراج شد. تعداد تحلیل‌ها و انواع مدل‌های عددی مورد استفاده در این مطالعه باعث به دست آمدن نتایجی قابل اطمینان در این زمینه شده است چرا که با توجه به دسته‌بندی انواع پل‌های قوسی بنایی، موارد مدل‌سازی شده، هر دو دسته پل‌های با دهانه کوچک و بزرگ را پوشش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که در مجموع رفتار این سازه‌ها در برابر حرکت قطار پرسرعت پردیس

با توجه به سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت قطار پردیس نمی‌توان بطور قطع درباره ارتباط مقادیر ضرایب ضربه با سرعت حرکت قطار اظهار نظر کرد. بر اساس جدول ۸، در پل ۵ دهانه مقادیر ضریب ضربه تحت اثر تمامی قطارها مقدار ثابتی دارد و این موضوع تاکید می‌نماید که در پل‌های قوسی بنایی با دهانه‌های کوچک، هندسه قطار پردیس تأثیری بر رفتار آنها ندارد. در پل دو دهانه نیز تغییرات ضریب ضربه تحت اثر انواع قطارهای پردیس دارای الگوی مشخصی نبوده و نمی‌توان ارتباط خاصی بین این ضریب با مشخصات هندسی قطار یافت. بطور کلی می‌توان گفت که در اثر افزایش طول دهانه پل، تحت اثر بار دینامیکی یکسان، مقدار ضریب ضربه با کاهش روبرو می‌شود و این موضوع به مشخصات هندسی بار دینامیکی وابسته نیست. البته این موضوع نیز در آیین‌نامه‌ها برای سایر پل‌ها نیز تایید شده است که با افزایش طول دهانه پل، ضریب ضربه کاهش می‌یابد. با مقایسه ضرایب ضربه محاسبه شده در مدل‌های عددی و آیین‌نامه‌های مختلف مشاهده می‌شود که محدوده مجاز بر اساس آیین‌نامه‌ها برای پل دو دهانه بین ۱،۰۵ تا ۱،۱۴ و برای پل ۵ دهانه بین ۱،۲۶ تا ۱،۶۸ است. این در حالی است که اعداد محاسبه شده در مدل عددی برای پل دو دهانه حداکثر ۱،۰۳۷ و برای پل ۵ دهانه حداکثر ۱،۰۷۳ است. با مقایسه اعداد بدست آمده برای ضریب ضربه می‌توان نتیجه گرفت که آیین‌نامه‌ها برای پل‌های دهانه کوچک از ضریب اطمینان بالاتری استفاده نموده است. این موضوع در پژوهش‌های قبلی نیز به اثبات رسیده است، به عنوان نمونه مرجع (YAZDANI & AZIMI, 2020) نشان می‌دهد که رفتار بهتر پل‌های قوسی بنایی با دهانه بزرگتر نسبت به پل‌های قوسی بنایی با دهانه کوچکتر تحت اثر قطارهای پرسرعت بهتر است.

پل‌های با دهانه کوچک است. نتایج نشان داد باتوجه به عملکرد ضعیف پل‌های با دهانه کوچک تحت اثر عبور قطار پرسرعت، آیین‌نامه‌ها از ضریب اطمینان بزرگتری جهت محاسبه ضریب ضربه استفاده می‌نمایند. در نهایت بسیاری از نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر توسط پژوهش‌های گذشته برای پل‌های عرشه‌ای نیز بدست آمده بود که این موضوع نشان می‌دهد پل‌های قوسی بنایی علی‌رغم رفتار بسیار پیچیده‌شان مشابه سایر پل‌ها رفتار می‌نمایند.

مناسب است و در پل‌های قوسی بنایی با افزایش طول دهانه ضریب ضربه نیز کاهش می‌یابد و برخلاف نتیجه منبع (Ataei & Miri, 2018) است که بر اساس آن، طول دهانه پل با ضریب ضربه پل‌ها رابطه واضحی نداشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هندسه قطار پرسرعت پردیس هیچ تاثیری بر پل‌های قوسی بنایی با دهانه کوچک (دهانه ۶ متری) ندارد، اما در پل‌های با دهانه بزرگ (دهانه ۲۰ متری) هندسه قطار کاملاً بر مقادیر ضربه تاثیرگذار هستند. یکی دیگر از مهمترین نتایج پژوهش حاضر در مورد افزایش ضریب اطمینان در

۷-مراجع

- Structures*, 27(2), 161-175.
doi.org/10.12989/SCS.2018.27.2.161
- Hamidi, S. A., & Danshjo, F. (2010). Determination of impact factor for steel railway bridges considering simultaneous effects of vehicle speed and axle distance to span length ratio. *Engineering Structures*, 32(5), 1369-1376. **doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.015**
- Kwark, J., Choi, E., Kim, Y., Kim, B., & Kim, S. (2004). Dynamic behavior of two-span continuous concrete bridges under moving high-speed train. *Computers & structures*, 82(4-5), 463-474.
- Kwasniewski, L., Li, H., Wekezer, J., & Malachowski, J. (2006). Finite element analysis of vehicle-bridge interaction. *Finite Elements in Analysis and Design*, 42(11), 950-959.
- Ma, L., Zhang, W., Cai, S. C. S., & Li, S. (2021). The dynamic amplification factors for continuous beam bridges along high-speed railways [Article]. *Advances in Structural Engineering*, 24(11), 2542-2554. **doi.org/10.1177/13694332211003288**
- Marefat, M. S., Ghahremani-Gargary, E., & Ataei, S. (2004). Load test of a plain concrete arch railway bridge of 20-m span [Article]. *Construction and Building Materials*, 18(9), 661-667. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.025**
- Marefat, M. S., Yazdani, M., & Jafari, M. (2019). Seismic assessment of small to medium spans plain concrete arch bridges [Article]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(7), 894-915. **doi.org/10.1080/19648189.2017.1320589**
- Moghimi, H., & Ronagh, H. R. (2008). Impact factors for a composite steel bridge using non-linear dynamic simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 35(11), 1228-1243. **doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.07.003**
- O'Connor, C. (2000). *Bridge loads: An international perspective*. CRC Press.
- Trainset Iran DH4-1 PARADISE, Project: Y.5213-12 / F.0532. (2005). In O. m. S. T. System (Ed.).
- Yazdani, M., & Azimi, P. (2020). Assessment of railway plain concrete arch bridges subjected to high-speed trains. *Structures*, 27, 174-193. **doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.042**
- Yoon, H., Chin, W. J., Kang, J. Y., Kwark, J., & Hwang, E.-S. (2013). Computation of Impact Factor of High-Speed Railway Bridge by KTX Train Riding Test.
- Zhang, X., Sennah, K., & Kennedy, J. (2003). Evaluation of impact factors for composite concrete-steel cellular straight bridges. *Engineering Structures*, 25(3), 313-321.
- American Association of State, H., & Transportation, O. (2010). *AASHTO LRF D Bridge Design Specifications: US Customary Units*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Arema, L. M. D. (2013). American railway engineering and maintenance-of-way association. *Manual for railway engineering*.
- Ataei, S., & Miri, A. (2018). Investigating dynamic amplification factor of railway masonry arch bridges through dynamic load tests. *Construction and Building Materials*, 183, 693-705. **doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.151**
- Au, F. T. K., Wang, J. J., & Cheung, Y. K. (2002). Impact study of cable-stayed railway bridges with random rail irregularities. *Engineering Structures*, 24(5), 529-541.
- Azimi, P., & Yazdani, M. (2021). Assessment of Old Railway Bridges Under the Pardis High-Speed Train. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(5), 260-278. **doi.org/10.22065/jsce.2019.183400.1846**
- Bayraktar, A., Altuniik, A. C., Birinci, F., Sevim, B., & Türker, T. (2010). Finite-element analysis and vibration testing of a two-span masonry arch bridge [Article]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(1), 46-52. **doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000060**
- Biggs, J. M. (1964). *Introduction to structural dynamics*. McGraw-Hill.
- Delgado, R. E., Calçada, R. (Ed.), Goicolea, J. (Ed.), Gabaldon, F. (Ed.). (2008). *Dynamics of High-Speed Railway Bridges* (1st Edition ed.) [Engineering & Technology]. CRC Press **doi.org/10.1201/9780203895405**
- Forgács, T., Sarhosis, V., & Adány, S. (2020). Shakedown and dynamic behaviour of masonry arch railway bridges. *Engineering Structures*, 111474. **doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111474**
- Galvín, P., Romero, A., Moliner, E., & Martínez-Rodrigo, M. D. (2018). Two FE models to analyse the dynamic response of short span simply-supported oblique high-speed railway bridges: Comparison and experimental validation. *Engineering Structures*, 167, 48-64. **doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.052**
- Gou, H., Zhou, W., Chen, G., Bao, Y., & Pu, Q. (2018). In-situ test and dynamic response of a double-deck tied-arch bridge. *Steel and Composite*

Impact Factor Estimation of Railway Masonry Arch Bridges Subjected to the Pardis High-Speed Train

Peyman Azimi M.Sc., Grad., Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Mahdi Yazdani, Assistant Professor, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

E-mail: m-yazdani@araku.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

Currently, the Pardis high-speed train with a speed of 150 (km/h) is known as the only high-speed train in service in Iran. Impact factor or dynamic load allowance are the most important parameters that can express the dynamic behavior of the bridge under a train. These parameters are used in bridge design codes instead of exhaustive dynamic analyses. Although the use of impact coefficients in some cases provides conservative answers, the use of these coefficients and the possible relationships derived from them can be a good alternative to dynamic analyses due to time and computational cost savings. Masonry arch bridges are geometrically and behaviorally complex structures and it is impossible to prepare an accurate numerical model and to conduct dynamic analyses due to their multiplicity; therefore, calculating the impact factor due to the passage of high-speed trains can determine the initial behavior of masonry arch bridges. For this purpose, in the present study, first the finite element model of two masonry arch bridges was prepared which are completely different in terms of geometric and mechanical characteristics, and then by performing 52 dynamic analyzes, the time history of impact factor and dynamic load allowance has been calculated. The results show that the behavior of masonry arch bridges is appropriate in different conditions under the Pardis high-speed train and all the calculated impact coefficients are in the rational range.

Keywords: Masonry Arch Bridge, Dynamic Analysis, High-Speed Trains, Impact Factor, Dynamic Load Allowance