

Assessment of Old Railway Bridges Under the Pardis High-Speed Train

Peyman Azimi¹, Mahdi Yazdani^{2*}

1- M.Sc. in structural engineering, Faculty of engineering, Arak university, Arak, Iran

2- Assistant professor, faculty of engineering, Arak university, Arak, Iran

ABSTRACT

There are numerous old arch bridges in Iran that have been used as railway bridges for more than eighty years. In Iran's railway network, there are about 3,700 bridges which all of these have been designed based on service load in that time (low-speed trains) and are still serving for trains at maximum speed of 100 km/h. Using of high-speed trains has been spread all over the world in the last two decades. In recent years, the use of high-speed trains is necessary in the Iran. It is not possible at all to replace old masonry arch bridges due to field and economic constraints, so it is necessary to evaluate the dynamic behaviour of these bridges under the high-speed trains. To evaluate complex behavior of these bridges, results of field tests are required. Since it is not possible to perform field tests for all arch bridges, these structures should be simulated correctly by computers for structural assessment. The present study investigates two plain concrete arch bridge which are located in kilometer 23 and 24 of the old Tehran-Qom railway. The numerical model of the bridge is established in accordance with detailed geometrical properties of the bridges. The numerical model has been validated based on the existing experimental results. In the model updating procedure, the vertical deflection at the crown under static loading and the movement of the six-axle train by 60 and 80 km/h, as well as the first three modes of the bridges were selected as a calibration criterion. In the second step, different geometrical of Pardis high-speed train are used and totally 13 geometrical models have been detected and investigated. By using the finite element method and the macro-modelling approach, the km-23 and km-24 bridges were simulated and totally 26-time history dynamic analyses have been conducted. Dynamic behaviour of the bridge under moving load model of Pardis trains at speeds of 150km/h have been assessed. Finally, deflection and acceleration responses for all 26 dynamic analyses at the crown of the bridges have been extracted and compared. These analyses are conducted to the aim of finding opportunities and constraints in using railway masonry arch bridges in the Iran as it is necessary to use existing rail lines on the rail network, due to the high cost of the construction of new ones and the need to know the existing structures such as bridges and their properties under the impact of high-speed trains. A realistic prediction of the structure's response helps a rational operation of the bridges in the service, that's why the correct understanding of the dynamic behaviour of railway bridges is essential. The results of present study indicate that these bridges have good behaviour under high-speed trains.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 April 2019

Revise Date: 05 November 2019

Accept Date: 17 December 2019

Keywords:

Masonry arch bridge;
Finite element modeling;
Geometrical properties of
high-speed trains;
Pardis train;
Dynamic assessment.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.183400.1846

*Corresponding author: Mahdi Yazdani

Email address: m-yazdani@araku.ac.ir

بررسی رفتار پل‌های قدیمی راه‌آهن تحت اثر حرکت قطار پرسرعت پردیس

پیمان عظیمی^۱، مهدی یزدانی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- استادیار مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده

در شبکه راه‌آهن کشور ۳۶۰۰۰ پل وجود دارد که از میان آنها در حدود ۳۷۰۰ پل قوسی بنایی در حال سرویس‌دهی در شبکه راه‌آهن هستند. با توجه به قدمت ۸۰ ساله شبکه راه‌آهن، این پل‌ها برای بارهای سرویس آن زمان (قطارهای با سرعت پایین) طراحی شده‌اند و در حال حاضر برای قطارهای با سرعت حداکثر ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در حال سرویس‌دهی هستند. نظر به اهمیت قطارهای سریع‌السیر در صنعت ریلی و با توجه به اینکه بیشتر کشورهای توسعه یافته دارای شبکه راه‌آهن سریع‌السیر هستند، وجود این قطارها در کشور ضروری به نظر می‌رسد. به دلیل محدودیت‌های میدانی و اقتصادی جایگزینی این پل‌ها، ارزیابی رفتار آنها تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت امری ضروری است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت تنها قطار پرسرعت موجود در کشور (قطار پردیس) به وسیله ارزیابی دو پل قوسی بتنی غیرمسلح واقع در کیلومتر ۲۳ و ۲۴ راه‌آهن تهران-قم است. با توجه به رفتار پیچیده این سازه‌ها، انجام آزمایش‌های میدانی جهت ارزیابی رفتار آنها ضروری است، اما به علت تعدد این پل‌ها امکان انجام آزمایش‌های میدانی بر روی همه آنها وجود ندارد. بنابراین جهت مطالعه رفتار این پل‌ها، شبیه‌سازی دقیق آنها ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین در مطالعه حاضر از روش اجزای محدود جهت مدل‌سازی این سازه‌ها استفاده شده است. جهت به‌هنگام‌سازی مدل‌های عددی، جایجایی کلید قوس تحت بار استاتیکی و حرکت دیزل و همچنین فرکانس سه مود اول پل‌ها به عنوان معیار کالیبراسیون انتخاب شده‌اند. با تهیه ۱۳ مدل از قطار پرسرعت پردیس، به صورت بار متحرک و با سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت از روی مدل عددی عبور داده شده و در نهایت نتایج حاصل از ۲۶ عدد تحلیل دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این پل‌ها می‌توانند با ایجاد تمهیداتی دارای رفتار قابل قبولی در برابر حرکت قطار پرسرعت پردیس باشند.

کلمات کلیدی: پل‌های قوسی بنایی، تحلیل اجزای محدود، قطار پردیس، ویژگی‌های هندسی قطارهای پرسرعت، رفتار دینامیکی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.183400.1846	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.183400.1846	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۳۹۸/۰۹/۲۶	۱۳۹۸/۰۹/۲۶	۱۳۹۸/۰۸/۱۴	۱۳۹۸/۰۲/۰۷
				*نویسنده مسئول:		
				مهدی یزدانی		
				m-yazdani@araku.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

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 سریع‌السیر در نقاط مختلف جهان به شدت گسترش یافته است و در سال‌های اخیر نیز زمزمه استفاده از این قطارها در کشور شنیده شده است. در حال حاضر در شبکه راه‌آهن کشور در حدود ۳۷۰۰ پل قوسی بنایی وجود دارد که جایگزین کردن آنها به علت محدودیت‌های زمانی، میدانی و اقتصادی اصلاً امکان‌پذیر نیست. بنابراین ارزیابی رفتار دینامیکی پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای سریع‌السیر یک امر ضروری است.

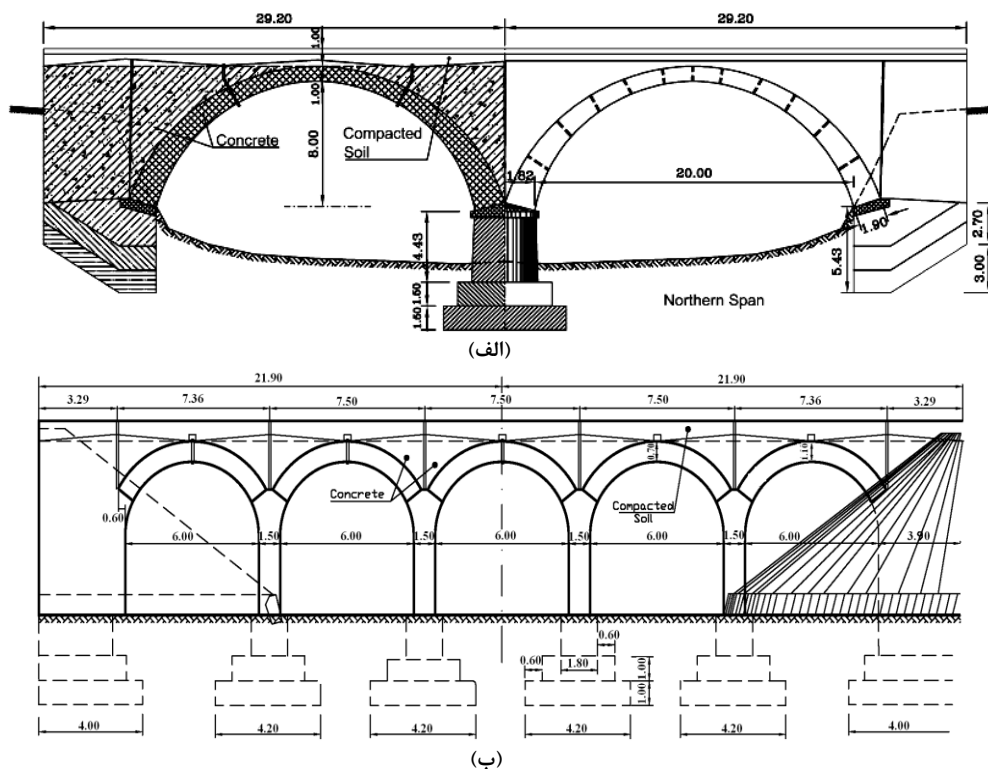
به طور کلی مطالعه رفتار پل‌های قوسی بنایی سابقه دیرینه‌ای در نقاط مختلف جهان دارد. با توجه به رفتار پیچیده آنها، مطالعات میدانی از گذشته تا به امروز همواره مورد توجه مهندسان و محققان بوده است، که از میان این تحقیقات می‌توان به مراجع [۱-۳] اشاره کرد؛ در ایران نیز معرفت و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۴] و عطایی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۵] در تحقیقات جداگانه‌ای به مطالعه میدانی ظرفیت باقیمانده تعدادی از پل‌های قوسی بنایی موجود در کشور پرداخته‌اند. به علت وجود محدودیت‌های میدانی، امکان انجام آزمایش‌های بارگذاری برای همه پل‌ها وجود ندارد، بنابراین شبیه‌سازی عددی این سازه‌ها جهت ارزیابی رفتار آنها یک امر ضروری و ناگزیر است که در این مورد با استفاده از نتایج آزمایش‌های میدانی نیز امکان مدل‌سازی عددی قابل اعتماد فراهم می‌آید. برای مدل‌سازی پل‌های قوسی بنایی از روش‌های اجزای محدود و اجزای مجزا به صورت گسترده استفاده شده است. بیشتر این مطالعات در مورد ارزیابی رفتار استاتیکی این پل‌ها تحت اثر بارهای قائم و محاسبه بار خرابی آنها بوده است که از میان آنها می‌توان به مراجع [۶-۹] اشاره کرد. همچنین در سال‌های اخیر نیز رفتار دینامیکی و لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی به صورت گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰-۱۵]. نتایج تحقیقات گذشته در مورد پل‌های قوسی بنایی حاکی از آن است که پل‌های قوسی بنایی ظرفیت بسیار بالایی در برابر بارهای استاتیکی دارند و همچنین ظرفیت لرزه‌ای پل‌های قوسی بنایی با طول دهانه کمتر از ۱۰ متر بسیار مناسب است.

درباره ارزیابی رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطار، از سال‌های نه‌چندان دور تا به امروز مطالعاتی انجام شده است [۱۶-۱۸]. اما تاکنون بررسی رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای سریع‌السیر در هیچ منبعی گزارش نشده است. از سوی دیگر، مطالعه در مورد بارهای دینامیکی ناشی از حرکت قطارهای سریع‌السیر در مقایسه با بار ناشی از قطارهای معمولی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند چرا که امروزه با توجه به اهمیت زمان جابجایی مسافر و کالا و نیز با افزایش سرعت حرکت در خطوط ریلی، استفاده از قطارهای سریع‌السیر رشد روزافزون داشته است. برخلاف کشور ایران، پیشینه مطالعه رفتار دینامیکی پل‌ها (پل‌های عرشه‌ای) تحت اثر بار وسایل نقلیه در سایر نقاط جهان به حدود یک قرن پیش باز می‌گردد. بالطبع مطالعه رفتار پل‌ها تحت اثر عبور قطارهای سریع‌السیر، از زمانی که اولین قطارهای پرسرعت در جهان مورد استفاده قرار گرفتند، آغاز شده است. اولین قطار سریع‌السیر دنیا با نام شینکانسن در ژاپن و در سال ۱۹۶۴ با سرعت ۲۱۰ کیلومتر بر ساعت آغاز به کار کرد. اولین قطار پرسرعت در اروپا نیز قطار سریع‌السیر فرانسه بود که در سال ۱۹۸۳ و با سرعت ۲۷۰ کیلومتر بر ساعت مورد بهره‌برداری قرار گرفت [۱۹]. با توجه به پیچیدگی‌های مربوط به شبیه‌سازی قطارهای سریع‌السیر، از آن زمان تاکنون تحقیقات بسیاری انجام شده است. از میان تحقیقات انجام شده می‌توان به مطالعه کوآرک و همکاران درباره قطارهای سریع‌السیر در کره جنوبی اشاره کرد. نتایج آنها نشان می‌دهد که حداکثر خیز پل‌های بتنی عرشه‌ای توسط لوکوموتیوهایی که سنگین‌تر از واگن‌های مسافری هستند رخ می‌دهد و بار مسافران بر میزان حداکثر خیز در این پل‌ها تأثیری ندارد [۲۰]. مطالعه گورباجوک و همکاران روی ناوگان ریلی پرسرعت استرالیا [۲۱]، مطالعه برونٹی و همکاران بر روی راه‌آهن پرسرعت ایتالیا [۲۲] و مطالعه لاکارونارا و همکاران با استفاده از قطارهای سریع‌السیر فرانسه، آلمان و ایتالیا از دیگر تحقیقات مهم در این زمینه هستند [۲۳]. مطالعات گسترده عملی و نظری درباره رفتار دینامیکی پل‌های راه‌آهن تحت اثر حرکت قطارهای سریع‌السیر در چین توسط محققین مختلف صورت گرفته است که شرایط خوب قطارهای مفصلی در سرعت‌های بالا بر روی پل‌های مورد مطالعه در این کشور از جمله نتایج این تحقیقات بوده است که در مراجع [۲۴-۳۲] به آنها اشاره شده است. در مطالعه‌ی 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 گالوین و همکارانش مطالعه پاسخ پل بوده است، جهت مدل سازی قطار روی پل از مدل بار متمرکز متحرک استفاده شده است. نتایج آنها حاکی از دقت مدل عددی اجزای محدود در پیش بینی پاسخ پل و ارزیابی حالت حدی بهره برداری شتاب قائم در خطوط راه آهن دارای بالاست است [۳۳]. همچنین مطالعات متعددی در کشورهای مختلف در مورد موضوع تشدید در پل ها تحت اثر حرکت قطار نیز صورت گرفته است. بر این اساس، معرفی عامل مهم "تعداد وسایل عبوری از روی پل" در ایجاد این پدیده و امکان عدم وقوع تشدید در صورت کم بودن تعداد وسایل نقلیه عبوری را می توان به عنوان یکی دیگر از نتایج این تحقیقات دانست که در مراجع [۳۴-۳۸] ذکر شده اند. نکته مشترک در میان تمامی پژوهش های انجام شده، تمرکز بر پل های عرشه ای مسطح (مدل سازی پل به صورت یک تیر دو سر مفصل) بوده است. بنابراین وجه تمایز پژوهش حاضر با سایر مطالعات صورت گرفته در این زمینه، شبیه سازی رفتار واقعی پل به همراه جزئیات کامل آن است. امید است با استفاده از نتایج مطالعه حاضر بتوان در صورت نیاز نسبت به ادامه سرویس دهی پل های قوسی بنایی جهت عبور قطار پرسرعت پردیس تصمیم گیری نمود.

۲- ویژگی پل های مورد مطالعه

پل های مورد بررسی در پژوهش حاضر در کیلومتر ۲۳ و ۲۴ راه آهن قدیم تهران- قم واقع شده اند. مشخصات هندسی آنها در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است. پل کیلومتر ۲۳ دارای دو دهانه ۲۰ متری و دو کوله از نوع بسته در طرفین آن است و جمعاً طول آن به ۶۰ متر می رسد. در کلید قوس، ضخامت قوس برابر ۱ متر و در پاتاق برابر ۱/۹ متر است. در این پل ترک های اولیه ای به ضخامت ۱ الی ۳ سانتی متر در کلید هر دو قوس و پاتاق قوس، به صورت تمام عمق مشاهده شده است. پهنای ترک ها از پایین به بالا کاهش یافته و در نیمه بالایی ضخامت قوس، بسته به نظر می رسد. پل کیلومتر ۲۴ دارای پنج دهانه ۶ متری و دو کوله در طرفین آن است و جمعاً طول آن ۴۰ متر است. در این پل ترک های اولیه ای به ضخامت حدوداً ۲ سانتی متر در کلید هر پنج قوس به صورت تمام عمق مشاهده شده است که پهنای آنها از پایین به بالا کاهش یافته و در نیمه بالایی ضخامت قوس، بسته به نظر می رسند. در ساخت این پل ها از آرماتور استفاده نشده است و تمامی بخش ها شامل قوس ها، دیوارهای جانبی، کوله ها، پایه ها و شالوده از بتن غیر مسلح ساخته شده اند و بیش از ۸۰ سال از ساخت آنها می گذرد.



شکل ۱: مشخصات هندسی پل های مورد مطالعه (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴ [۴]

جهت تعیین مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در هر دو پل، آزمایش مغزه‌گیری روی قسمت‌های مختلف پل‌ها انجام شده است که نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است و در مرجع [۴] به صورت کامل گزارش شده است. مطابق شکل ۱ در هر دو پل، قوس‌ها به وسیله درزهای سازه‌ای از هم جدا شده‌اند. تنها نقطه اتصال این قوس‌ها پایه‌ها هستند که باعث می‌شوند باربری قوس‌ها بر هم اثر داشته باشند. کوله‌ها نیز با استفاده از درز سازه‌ای از کل پل مجزا شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات هندسی پل‌های مورد مطالعه [۴]

پل	تعداد دهانه	طول دهانه (متر)	شکل قوس	ضخامت کلید (متر)	ضخامت پاتاق (متر)	عرض قوس (متر)	ارتفاع پل (متر)	ضخامت دیوار جانبی (متر)
کیلومتر ۲۳	۲	۲۰	قسمتی از دایره	۱	۱/۹	۳/۹	۱۲	۱
کیلومتر ۲۴	۵	۶	نیم دایره	۰/۷	۱/۱	۳/۹	۸	۱

جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن [۴]

عنوان	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	وزن مخصوص (kg/m^3)
پل	۲۳	۲۳	۲۴
بتن پرکننده	۱۷/۶	۲۰/۲	۲۲۱۷
قوس	۱۷/۳	۱۷	۲۲۹۰
پایه	۲۷/۹	۳۷/۳	۲۲۵۰

۳- شبیه‌سازی عددی

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، شبیه‌سازی عددی پل‌ها جهت ارزیابی رفتار آنها یک امر ضروری و ناگزیر است. برای مطالعه رفتار پل‌های قوسی بنایی روش‌های متعددی وجود دارد که از جمله مهم‌ترین و دقیق‌ترین آنها می‌توان به روش اجزای محدود اشاره کرد. برای این منظور در پژوهش حاضر نیز از روش اجزای محدود و روش درشت مدل‌سازی جهت تهیه مدل عددی استفاده شده است. مدل‌سازی صورت گرفته شامل دو بخش بوده است که در آن، مدل‌سازی پل به روش اجزای محدود و مدل‌سازی بار روی پل 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. از آنجا که در پژوهش حاضر بررسی پاسخ پل‌های قوسی بنایی مد نظر است، از مدل بار متحرک جهت شبیه‌سازی بار قطار روی پل استفاده شده است. مطالعات عملی و نظری متعددی جهت تعیین رفتار دینامیکی پل‌ها تحت حرکت قطار پرسرعت در خطوط راه‌آهن کشورهای مختلف صورت گرفته است. تمامی این مطالعات با استفاده از یک یا چند روش از سه روش مذکور جهت مدل‌سازی قطار انجام شده‌اند. تمایز پژوهش حاضر با سایر مطالعات، شبیه‌سازی دو بعدی پل‌ها همراه با جزئیات کامل آنها است. چرا که نکته مشترک در میان تمامی پژوهش‌های انجام شده، تمرکز بر پل‌های عرشه‌ای مسطح (مدل‌سازی پل به صورت یک تیر دو سر مفصل) بوده است. رفتار واقعی سازه 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. در عمل، اعمال تمامی این ویژگی‌ها به صورت دقیق مقدور نیست. از این رو برخی از عوامل فوق به صورت غیرمستقیم و با انجام کالیبراسیون وارد مدل می‌شوند. در این مطالعه، اجزای مختلف سازه شامل قوس‌ها، پایه‌ها، کوله‌ها و دیوارهای جانبی مطابق با وضعیت موجود پل با رعایت جزئیات، شبیه‌سازی شده‌اند. با توجه به رفتار عمدتاً دو بعدی پل‌ها تحت اثر بار قائم، از تحلیل کرنش مسطح در فرایند شبیه‌سازی استفاده شد است. در مدل عددی حاضر از المان‌های چهار گرهی و مرتبه بالای هشت گرهی در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. در مجموع، مدل اجزا محدود از ۷۵۰۵ المان و ۱۶۱۲۹ گره (معادل ۳۲۲۵۸ درجه آزادی) برای پل کیلومتر ۲۳ و از ۸۰۴۰ المان و ۱۶۶۷۴ گره (معادل ۳۳۳۴۸ درجه آزادی) برای پل کیلومتر ۲۴ تشکیل شده است.

در فرایند شبیه‌سازی پل، رفتار مصالح غیرخطی فرض شده است و از مدل الاستو-پلاستیک با معیار تسلیم دراگر- پراگر جهت پیش‌بینی خرابی‌های محتمل استفاده شده است. با توجه به اینکه مقاومت فشاری قسمت‌های مختلف بتن از آزمایش مغزه‌گیری حاصل شده است، می‌توان سایر پارامترهای ورودی معیار دراگر- پراگر را به طور مستقیم محاسبه کرد [۳۹]. در معیار دراگر- پراگر ضریب

چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک (ϕ) و زاویه اتساع (ψ) به عنوان پارامترهای ورودی بایستی مورد محاسبه قرار گیرند و بعد از محاسبه آنها سطح تسلیم f با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، I_1 اولین نامتغیر تانسور تنش و J_2 دومین نامتغیر تانسور تنش انحرافی است. ضرایب k و α ثابت‌های مثبتی هستند که به خواص مصالح بستگی دارند. جهت محاسبه ضرایب k و α در بتن، می‌توان از روابط زیر نیز استفاده کرد [۳۹]:

$$\alpha = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2)$$

$$k = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (3)$$

یا

$$\alpha = \frac{m - 1}{\sqrt{3}(m + 1)} \quad (4)$$

$$k = \frac{f'_c}{\sqrt{3}(m + 1)} \quad (5)$$

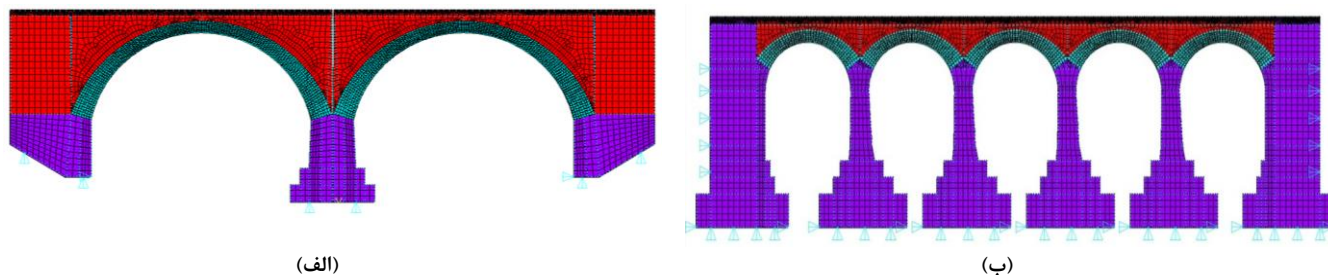
در رابطه‌های (۴) و (۵)، متغیر m از رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$m = \frac{f'_c}{f'_t} \quad (6)$$

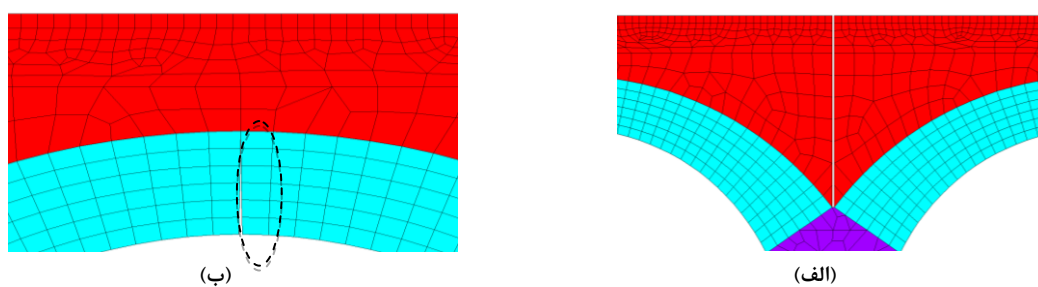
در رابطه (۶)، f'_c و f'_t به ترتیب مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن هستند. مقاومت کششی در سازه‌های بنایی عمدتاً ناچیز است و به همین دلیل مقدار آن را برابر صفر در نظر می‌گیرند. در بتن، مقاومت کششی در حدود ۸ تا ۱۵ درصد مقاومت فشاری آن است ($f'_t = (0.08 - 0.15)f'_c$). بنابراین از رابطه (۷) جهت حصول نتایج واقع‌گرایانه‌تر در پژوهش حاضر برای محاسبه مقدار مقاومت کششی بتن مورد استفاده در پل‌ها استفاده شده است [۴۰]:

$$f'_t = 0.56 \sqrt{f'_c} \quad (7)$$

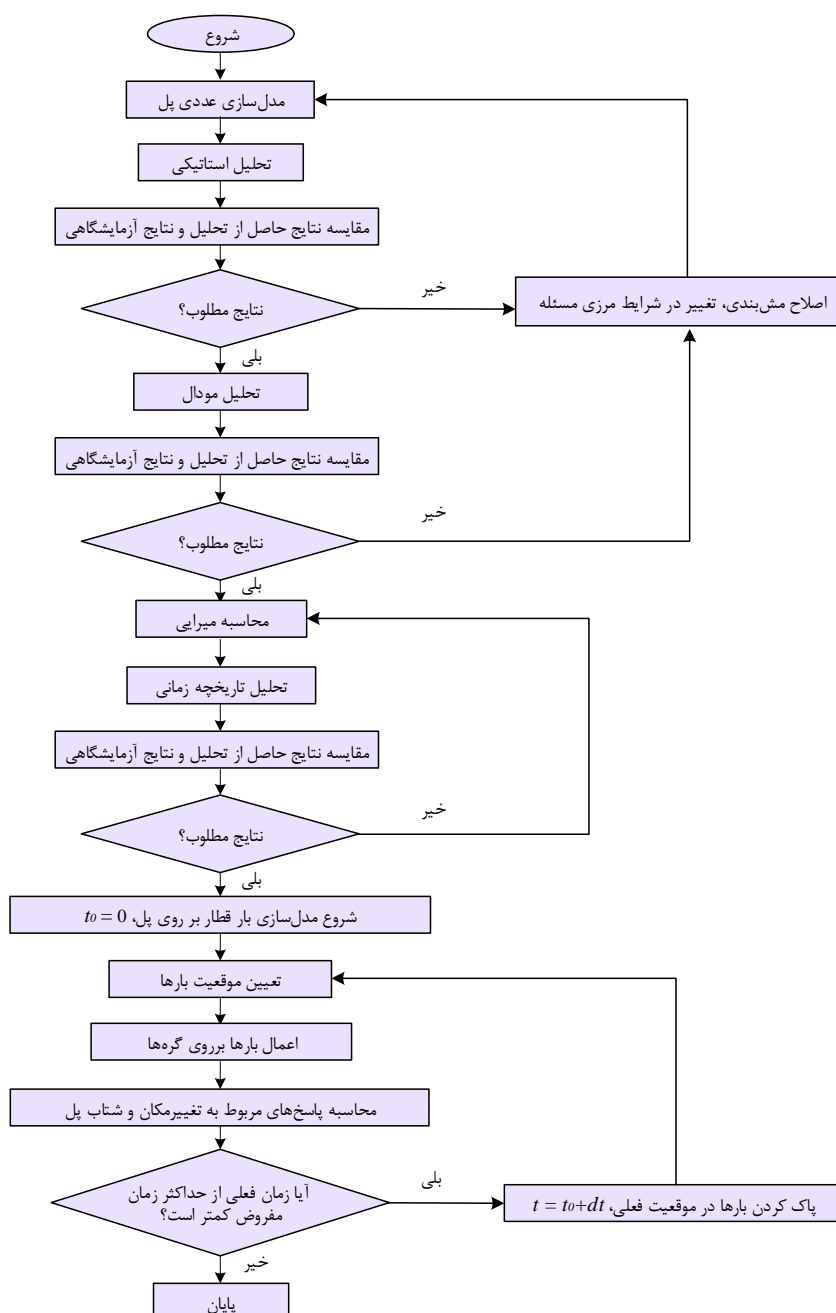
مدل اجزای محدود همراه با شرایط مرزی پل در شکل ۲ نشان داده شده است. ترک‌های اولیه و درزهای اجرایی به صورت فضای خالی در نظر گرفته شده‌اند که در شکل ۳ شکل ۳ نحوه مدل‌سازی آنها نشان داده شده است. جهت شفاف‌سازی روش تحقیق و به طور کلی مراحل طی شده در فرایند تحلیل دینامیکی مدل‌های عددی تحت اثر حرکت قطارهای سریع‌السیر پردیس، فلوجارتی در شکل ۴ ارائه شده است. این فلوجارت شامل مراحل مختلف مدل‌سازی سازه پل، صحت‌سنجی سازه‌ها در سه مرحله، مدل‌سازی بار قطار، اطلاعات ورودی و نیز خروجی نهایی تحلیل‌های دینامیکی است.



شکل ۲: مدل اجزای محدود و شرایط مرزی پل‌ها (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴



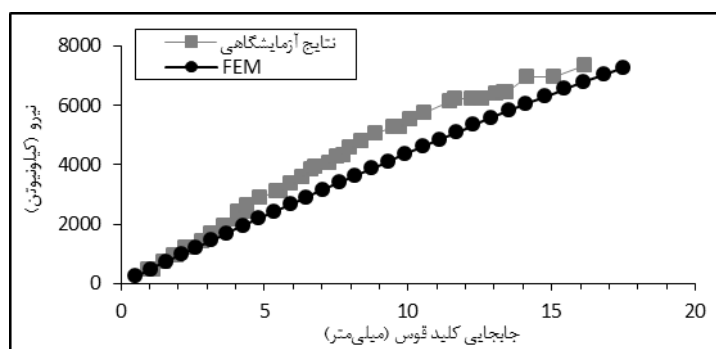
شکل ۳: مدل سازی ناپیوستگی های موجود در پل ها (الف) مدل سازی درز اجرایی (ب) مدل سازی ترک در کلید قوس



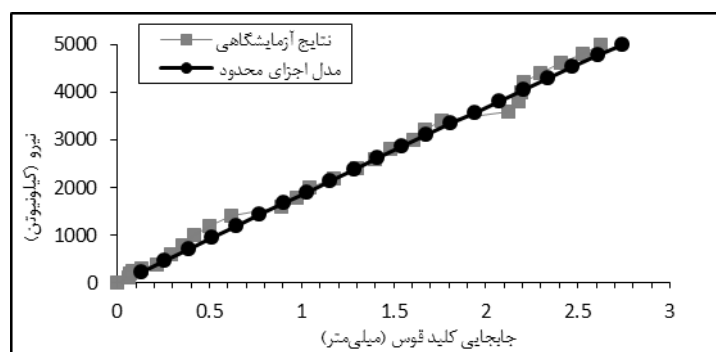
شکل ۴: الگوریتم فرایند تحلیل مدل های عددی تحت اثر قطار پرسرعت

۴- اعتبارسنجی

در آزمایش دینامیکی، دیزل شش محوره ۱۲۰ تنی با سرعت‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ کیلومتر بر ساعت از روی پل‌ها عبور داده شده و جابجایی کلید قوس تحت اثر حرکت قطار ثبت شده است. فرکانس سه مود اول پل‌ها نیز از آزمایش دینامیکی بدست آمده است. همچنین آزمایش استاتیکی، با استفاده از وزنه‌های ۴۰ کیلونیوتنی در دهانه سمت چپ پل ۲۳ کیلومتر و دهانه میانی پل ۲۴ کیلومتر، به صورت بارگذاری گسترده به طول شش متر انجام شده است. آزمایش استاتیکی تا رسیدن به بار ۷۲۸۰ کیلونیوتن برای پل ۲۳ کیلومتر و تا رسیدن به بار ۵۰۰۰ کیلونیوتن برای پل ۲۴ کیلومتر ادامه پیدا کرده است و جابجایی کلید قوس تحت اثر این بار نیز ثبت شده است [۴، ۱۵]. در ادامه جهت صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده، تحلیل استاتیکی، تحلیل مودال و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مطابق با آزمایش‌های انجام شده بر روی مدل‌های عددی انجام گرفته است و فرایند بهنگام‌سازی تا حصول نتایج معتبر ادامه پیدا کرده است. در شکل ۵ نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در گام دوم صحت‌سنجی مدل‌های ارائه شده، با استفاده از تحلیل مودال، سه فرکانس اصلی مدل عددی محاسبه شده و در جدول ۳ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵: مقایسه نتایج آزمایش استاتیکی و شبیه‌سازی عددی (الف) پل ۲۳ کیلومتر، (ب) پل ۲۴ کیلومتر

جدول ۳: فرکانس سه مود اول پل‌های مورد مطالعه [۱۵]

فرکانس	مود اول	مود دوم	مود سوم	فرکانس	مود سوم	مود دوم	مود اول	پل مورد مطالعه
۴/۴۸	۱۴/۶	۷/۹۱	۲۳/۲۳	۲۳ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	۲۳ کیلومتر	نتایج آزمایشگاهی
۴/۱۱	۱۵/۴۲	۸/۸۴	۲۲/۳۶	۲۴ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	۲۴ کیلومتر	مدل اجزای محدود
۹	۵/۶	۱۰/۶	۴	خطا (%)	۲/۶	۲۸/۳۸	۲۶/۴	

همان‌طور که مشخص است، نتایج عددی از دقت مناسبی برخوردار هستند. مطابق نتایج بدست آمده از شکل ۵، خطای موجود در تحلیل استاتیکی مدل عددی در پل ۲۳ کیلومتر و ۲۴ به ترتیب برابر با ۸ و ۱/۵ درصد است. همچنین مطابق نتایج بدست آمده از شکل

۵، میانگین خطای موجود بین تحلیل مودال مدل عددی در پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر با ۷/۴ و ۵/۹ درصد است. در نهایت جهت انجام صحت سنجی نهایی، دیزل شش محوره مطابق شکل ۷ بر روی پل کیلومتر ۲۳ با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت و برای پل کیلومتر ۲۴ 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 (۸) محاسبه می‌شود. همچنین α و β ضرایب 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 [۴۱].

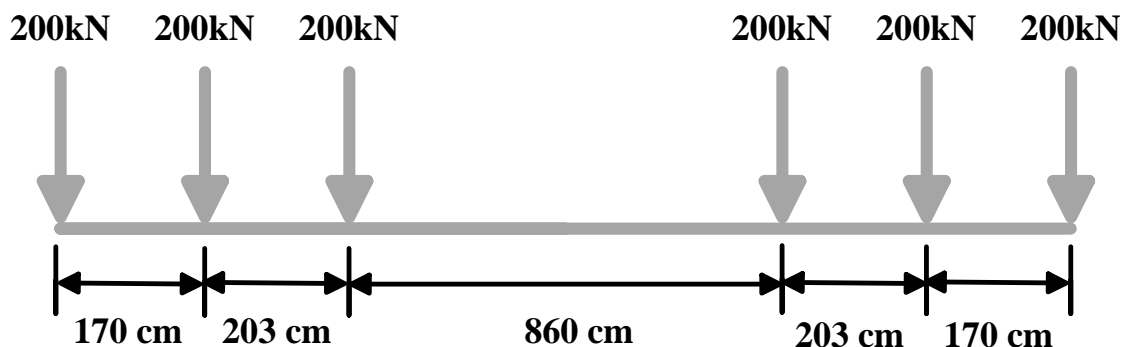
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (8)$$

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_1 \omega_n}{\omega_1 + \omega_n} \quad (9)$$

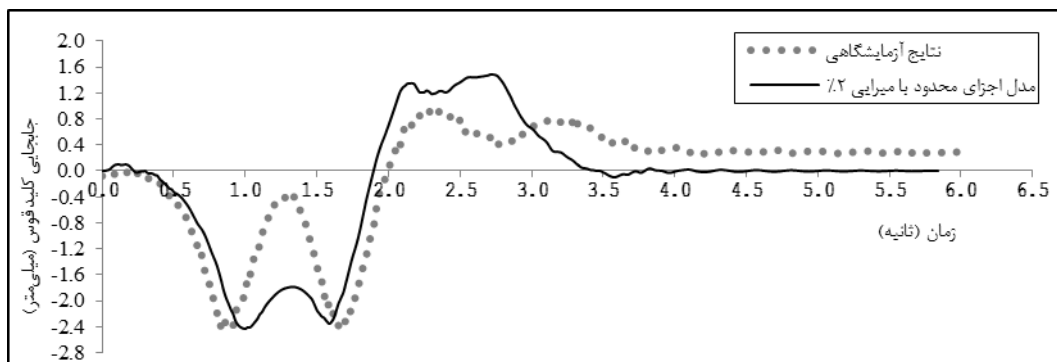
$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_n} \quad (10)$$

در نهایت با استفاده از روش نیومارک - بتا، تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی انجام شده و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. مطابق نتایج بدست آمده در شکل ۸، خطای موجود بین پاسخ حداکثر مدل عددی و آزمایش عبور دیزل در پل کیلومتر ۲۳ برابر با ۱ درصد و در پل کیلومتر ۲۴ برابر با ۱/۴ درصد است. از آنجایی که میزان میرایی این پل‌ها مشخص نبوده است، مشابه تحلیل‌های انجام شده در مراحل قبل، در این مرحله از اعتبارسنجی نیز درصد میرایی به عنوان پارامتر نامعین آن چنان تغییر داده شده است که در نهایت پاسخ حداکثر مدل عددی و آزمایش دارای اختلاف بسیار کمی باشند. لازم به ذکر است که با توجه به اهمیت حداکثر تغییر مکان ایجاد شده در قوس پل تحت اثر بار قطار، از این پارامتر به عنوان مبنای مقایسه عملکرد مدل‌های عددی با نمونه واقعی پل تحت آزمایش در بحث جابجایی استفاده شده است. از این رو، در مورد صحت سنجی صورت گرفته نیز پارامتر حداکثر تغییر مکان قوس پل مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که پل کیلومتر ۲۳ دارای میرایی ۲ درصد و پل کیلومتر ۲۴ دارای میرایی ۵ 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 آنها با افزایش طول دهانه میزان میرایی نیز کاهش می‌یابد [۴۲].

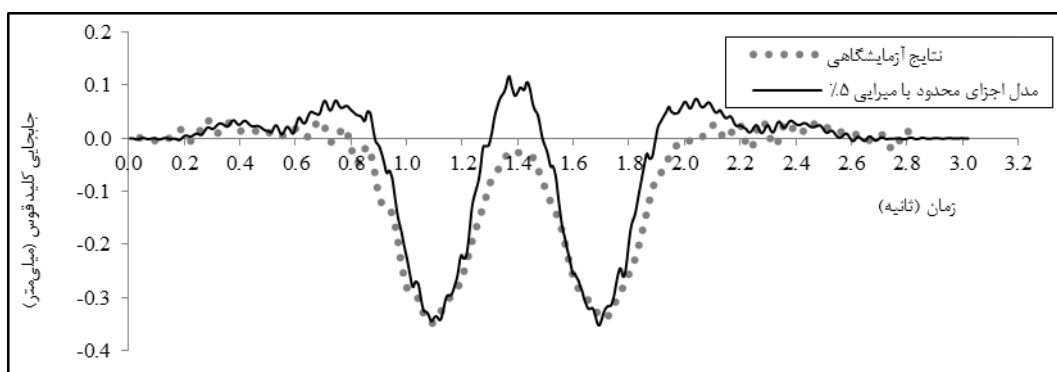
پس از انجام مراحل فوق مشخصات نهایی مصالح مورد استفاده در پل‌ها مطابق آنچه در جدول ۴ نمایش داده شده است، بدست آمد. مطابق نتایج بدست آمده از مدل عددی می‌توان استنباط کرد که مدل عددی مذکور با موفقیت مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و می‌توان نتیجه گرفت که مدل اجزای محدود ارائه شده، قابلیت نمایش مشخصات دینامیکی ثانویه سازه را دارا است.



شکل ۶: بار متحرک دیزل شش محوره



(الف)



(ب)

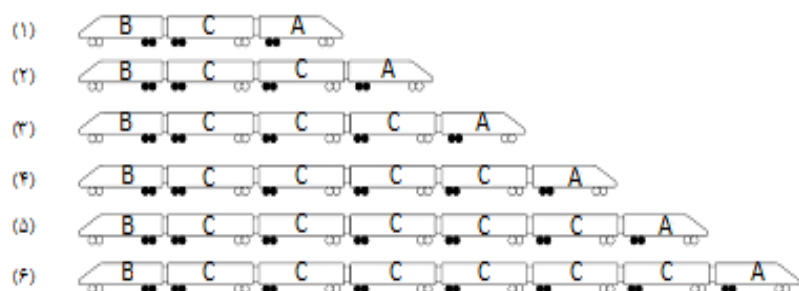
شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایش عبور دیزل و شبیه سازی عددی (الف) پل کیلومتر ۲۳ تحت سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت، (ب) پل کیلومتر ۲۴ تحت سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت

جدول ۴: مشخصات نهایی اعضای سازه ای

عنوان	وزن مخصوص (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	ضریب چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)
پل مورد مطالعه	۲۲۸۰	۲۴	۰/۲۱	۲۳	۲۴
قوس	۲۲۹۰	۲۴/۹	۰/۱۶۷۶	۲۳/۳۷	۵۳
پایه	۲۲۵۰	۳۶/۵	۰/۱۸۰۸	۵/۱	۵۱/۲
پرکننده	۲۲۱۷	۱۰/۹	۰/۲۸۸۳	۱/۷۵	۳۶/۵

۵- معرفی قطار پرسرعت پردیس

در پژوهش حاضر از قطار پردیس به عنوان اولین قطار پرسرعت ایران استفاده شده است تا رفتار پل های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطارهای پرسرعت مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به هندسه های مختلف قطار پردیس در مجموع ۱۳ هندسه مختلف قطار پردیس به صورت تک و چندگانه مطابق شکل ۹ و جدول ۷ در نظر گرفته شده است. این امر به منظور انجام مطالعه کاملی بر روی رفتار پل ها تحت حرکت این نوع قطار صورت گرفته است. جهت تحلیل دینامیکی، قطار پردیس به عنوان نیروی متحرک تلقی شده و به دلیل کوچک بودن جرم قطار نسبت به پل از اثر اینرسی جرم قطار صرف نظر شده است. بنابراین با توجه به اینکه هدف از مطالعه حاضر بررسی پاسخ پل بوده است، محورهای قطار به صورت نیروهای متمرکز متحرک با فاصله مشخص و با سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت از روی پل ها عبور داده شده اند. همچنین در شکل ۱۰ هندسه یک واگن از قطار پردیس جهت ارزیابی دینامیکی آن نشان داده شده است و مشخصات واگن ها شامل بار محورها و فاصله واگن ها در جدول ۶ درج شده اند.



(الف)

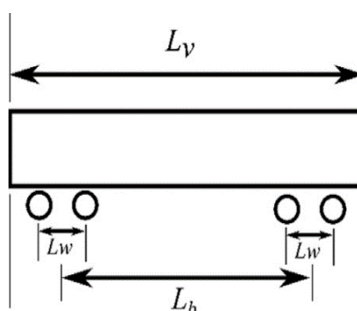


(ب)

شکل ۸: هندسه انواع قطارهای مورد مطالعه (الف) تک (ب) چندگانه [۴۳]

جدول ۵: مشخصات کلی قطار پردیس با هندسه‌های مختلف [۴۳]

شماره قطار	تعداد محورها	وزن قطار (کیلو نیوتن)	طول قطار (متر)
۱	۱۲	۲۳۷۶/۸	۸۹/۳
۲	۱۶	۳۱۶۸/۴	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 ۹: هندسه یک واگن قطار پردیس، L_w طول یک واگن، L_b فاصله دو بوژی، L_y فاصله دو چرخ یک بوژی

جدول ۶: مشخصات واگن‌های موجود در قطار پردیس [۴۳]

پارامتر	واحد	واگن A	واگن B	واگن C
بار هر محور	کیلو نیوتن	۱۹۷/۸	۱۹۸/۵	۱۹۷/۹
طول واگن (Lv)	متر	۲۱/۳	۲۱/۳	۲۱/۳
فاصله دو بوژی (Lb)	متر	۱۸/۷	۱۸/۷	۱۸/۷
فاصله دو چرخ یک بوژی (Lw)	متر	۲/۶	۲/۶	۲/۶
فاصله نزدیک‌ترین محورها دو بوژی مجاور	متر	۱۶/۱	۱۶/۱	۱۶/۱

لازم به ذکر است که واگن‌های B و A 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. مقادیر مربوط به فواصل میان واگن‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است.

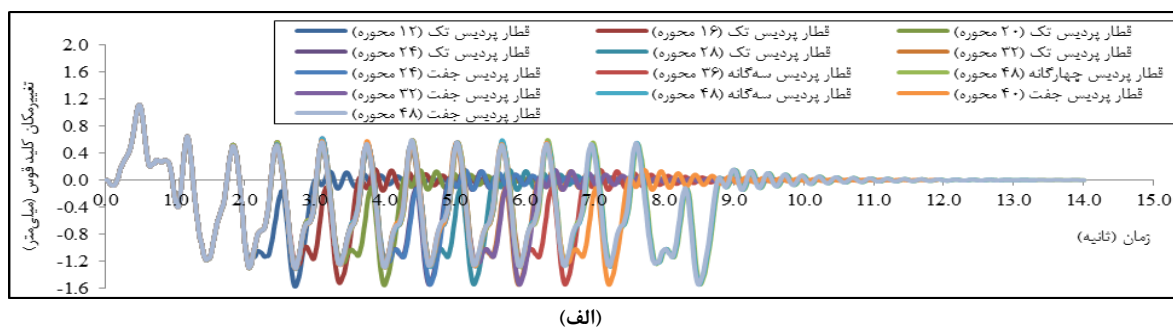
جدول ۷: فاصله واگن‌های مختلف در قطار پردیس [۴۳]

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

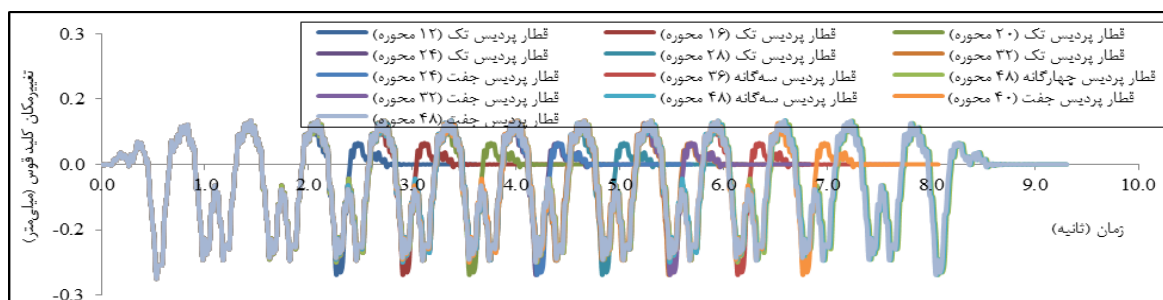
۶- پاسخ پل‌ها به حرکت قطار پردیس

پس از انجام ۲۶ تحلیل دینامیکی عبور قطار پرسرعت پردیس بر روی پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴، پاسخ جابجایی و شتاب کلید قوس به عنوان پارامترهای مهم در ارزیابی رفتار پل‌ها تحت اثر قطارهای سریع‌السیر استخراج شده و در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نمایش داده شده است. جهت ارزیابی نتایج بدست آمده، شکل ۱۳ و شکل ۱۴ ارائه شده است. در شکل ۱۳ حداکثر تغییرمکان و در شکل ۱۴ حداکثر شتاب در هر دو پل برای ۱۳ قطار مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳، حداکثر تغییرمکان ایجاد شده در کلید قوس پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر با ۱/۵۷ و ۰/۲۶۲ میلی‌متر است. همچنین حداکثر مقدار شتاب در کلید قوس پل کیلومتر ۲۳ برابر با ۰/۹۳g و در کیلومتر ۲۴ برابر با ۰/۱۶۶g است. نتایج حاکی از آن است که در پل کیلومتر ۲۴ مقدار شتاب بیشینه برای قطارهایی که دارای تنها یک واگن مسافری هستند رخ داده است که در آن، مقدار شتاب بیشینه برای قطارهای تک و چندگانه یکسان است. برخلاف پل کیلومتر ۲۴، در پل کیلومتر ۲۳ مقادیر شتاب بیشینه ایجاد شده برای قطارهای تک، کمتر از سایر قطارها بوده است. البته همان‌طور که از نتایج پیداست، شتاب بیشینه و جابجایی حداکثر تا حدود زیادی مستقل از هندسه قطارها هستند.

در این پژوهش، دو پارامتر تغییرشکل و شتاب قائم پل به عنوان معیارهای ایمنی ترافیک در نظر گرفته شده‌اند. مطابق آیین‌نامه اروپا، حداکثر مقدار مجاز برای جابجایی وسط دهانه پل، نباید از ۱/۶۰۰ طول دهانه تجاوز نماید ($\Delta_{max} \leq L/600$). همچنین حداکثر شتاب پل در اثر عبور قطار پرسرعت نباید از ۰/۳۵g در خطوط دارای بالاست و از ۰/۵g در خطوط بدون بالاست بیشتر شود [۴۴]. بنابراین مطابق نتایج بدست آمده، هر دو پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ معیارهای ایمنی را برای حرکت قطار پرسرعت پردیس دارا هستند که این به نوبه خود بسیار نویدبخش است.

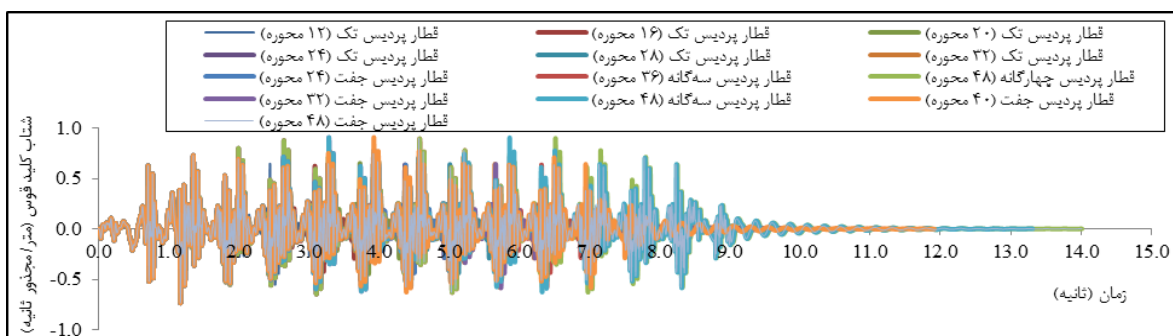


(الف)

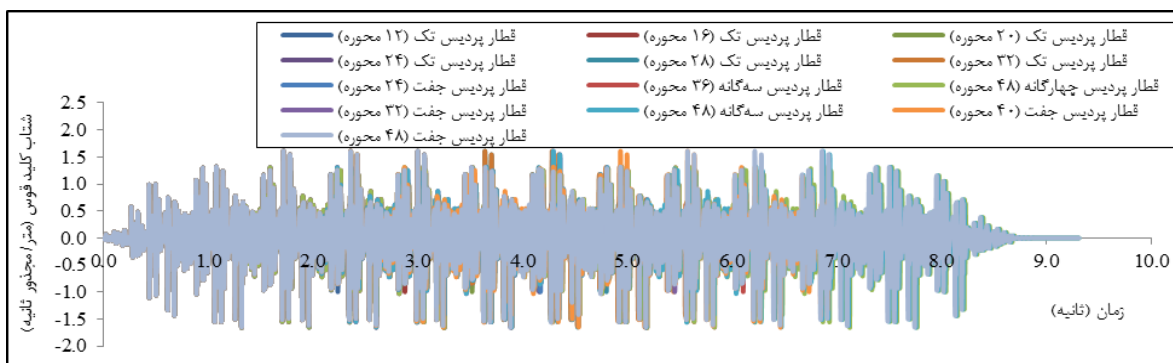


(ب)

شکل ۱۰: تغییر مکان کلید قوس (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴

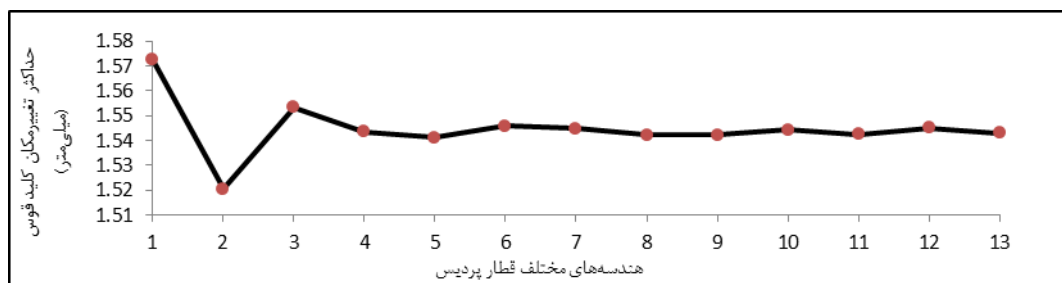


(الف)

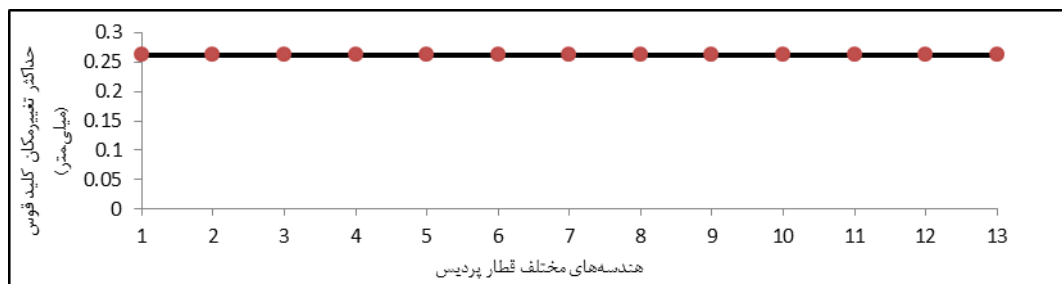


(ب)

شکل ۱۱: شتاب کلید قوس (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴

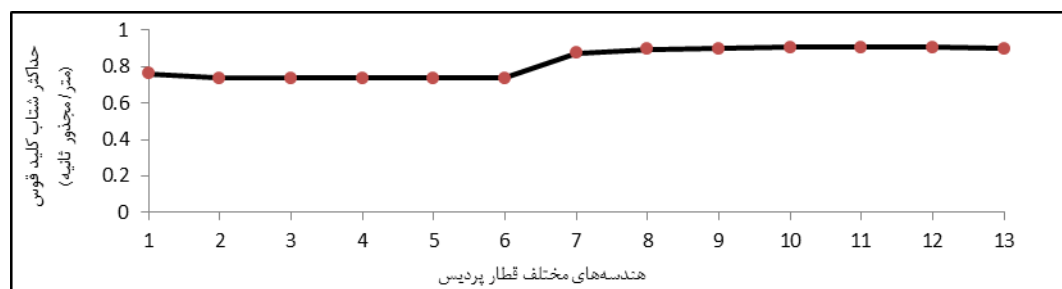


(الف)

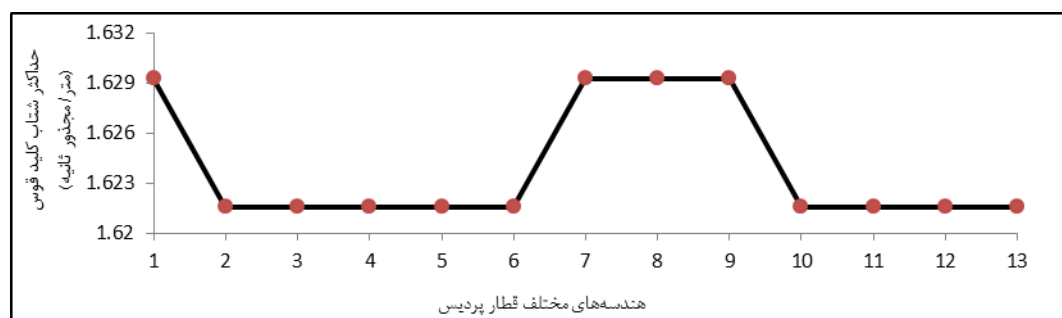


(ب)

شکل ۱۲: تغییر مکان حداکثر کلید قوس (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴



(الف)



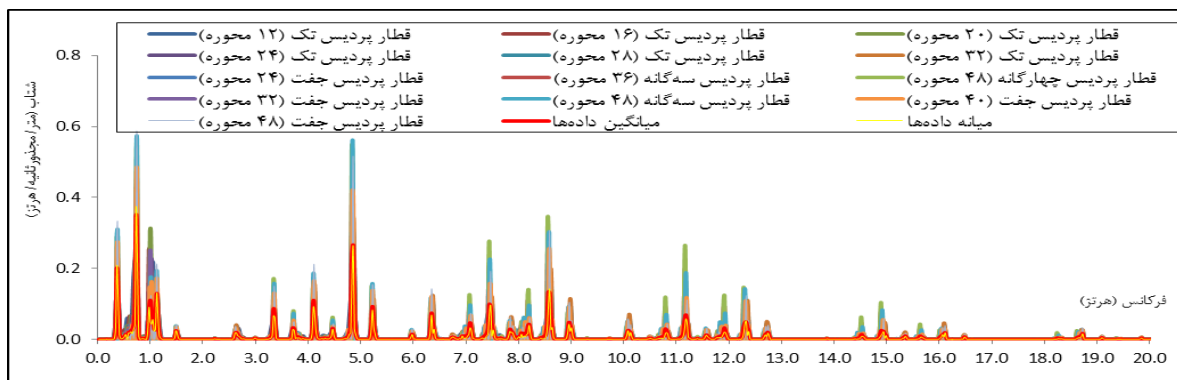
(ب)

شکل ۱۳: شتاب حداکثر کلید قوس (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴

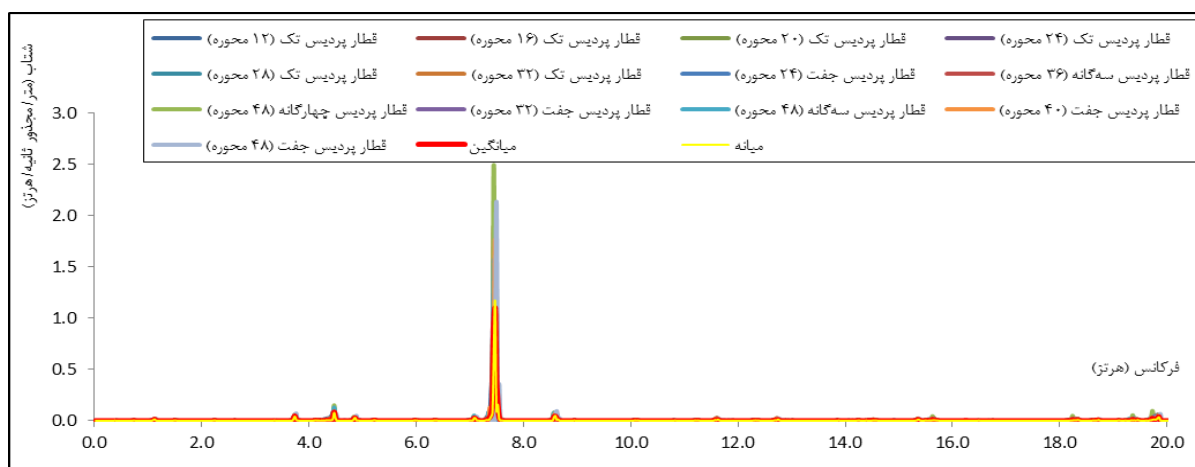
نتایج ارائه شده در اشکال ۱۰ تا ۱۳ مربوط به پاسخ پل‌ها تحت اثر حرکت قطار پردیس است. جهت ارزیابی دقیق‌تر نتایج بدست آمده، بهتر است رفتار قطار نیز در ارزیابی لحاظ شود. برای این منظور، فرکانس حرکت قطارهای مورد مطالعه در جدول ۸ ارائه شده است. این مقدار با در نظر گرفتن کمترین فاصله ما بین واگن‌ها و سرعت حرکت قطار محاسبه شده است. جهت مقایسه فرکانس قطار پردیس با پاسخ پل‌ها، با استفاده از تبدیل فوریه، پاسخ شتاب - زمان پل‌ها در شکل ۱۲ مطابق شکل ۱۴ تحت عنوان نمودار طیف توان در برابر فرکانس در حوزه فرکانس ارائه شده است. با مقایسه مقادیر بدست آمده در شکل ۱۴ و مقدار فرکانس محاسبه شده در جدول ۸ می‌توان گفت در صورتی که مقدار فرکانس بدست آمده ناظر بر قله‌ای در نمودارهای موجود در شکل ۱۴ باشد، پدیده تشدید در اثر عبور قطار بر روی پل‌ها اتفاق افتاده است، که این موضوع شامل پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ نمی‌شود.

جدول ۸: فرکانس قطار پردیس بر حسب هرتز

پارامتر	واحد	واگن‌های A، B و C
سرعت حرکت قطار	متر بر ثانیه	۴۱/۷
فرکانس واگن (fv)	هرتز	۱/۵۶



(الف)



(ب)

شکل ۱۴: نمودار طیف توان برای پل‌ها (الف) پل کیلومتر ۲۳ (ب) پل کیلومتر ۲۴

۷- ارزیابی نتایج

با توجه به نتایج بدست آمده از مدل‌های عددی، می‌توان نتایج زیر را جهت ارزیابی رفتار پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطار پرسرعت پردیس استنباط کرد.

- در فرایند به‌هنگام‌سازی مدل عددی درصد میرایی پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر ۲ و ۵ درصد محاسبه شد. درصد میرایی محاسبه شده برای پل کیلومتر ۲۳ با دهانه بزرگتر (۲۰ متر) کمتر از میرایی پل کیلومتر ۲۴ با دهانه کوچکتر (۶ متر) است که این موضوع در اکثر مراجع نیز تایید شده است. مهم‌ترین پارامتر موثر بر رفتار پل‌های قوسی بنایی طول دهانه است که در آنها با افزایش طول دهانه درصد میرایی کاهش می‌یابد.
- تحت اثر حرکت قطار پرسرعت پردیس، حداکثر خیز محاسبه شده برای پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر با ۱/۵۷ و ۰/۲۶۲ میلی‌متر است که این میزان خیز بسیار کمتر از مقدار مجاز آن است. مطابق رابطه $\Delta_{max} \leq L/600$ ، خیز مجاز پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر با ۳۳/۳ و ۱۰ میلی‌متر است. بنابراین می‌توان گفت سازه این پل‌ها در اثر حرکت قطار پردیس در سرعت مورد مطالعه رفتار مناسبی دارند.
- میزان درصد استفاده از ظرفیت جابجایی مجاز در پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر ۴/۷ و ۲/۸ درصد است. همان‌طور که مشخص است پل کیلومتر ۲۴ به درصد کمتری از ظرفیت جابجایی مجاز خود رسیده است که علت آن را می‌توان در طول دهانه کوچکتر و متعاقباً درصد میرایی بیشتر آن دانست. البته یکی دیگر از دلایل آن می‌تواند سختی بیش از حد مصالح پل کیلومتر ۲۴ باشد.

- نتایج بدست آمده نشان دادند که در پل‌های قوسی بنایی مورد مطالعه، بار وارده توسط واگن‌های مسافری سبب ایجاد خیز حداکثر در پل نمی‌شوند و تعدد واگن‌ها و اشکال مختلف توزیع بار در قطار بر این پارامتر تأثیری ندارد که این موضوع نیز در مرجع [۲۰] برای پل‌های بتنی عرشه‌ای گزارش شده است. همچنین خیز حداکثر در پل‌های قوسی بنایی نیز در اثر عبور لوکوموتیوهایی که سنگین‌تر از سایر واگن‌ها هستند رخ می‌دهد.
- تحت اثر حرکت قطار پرسرعت پردیس، حداکثر شتاب محاسبه شده برای پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۱/۶۳ متر بر مجذور ثانیه است که این میزان شتاب بسیار کمتر از مقدار مجاز آن است. شتاب مجاز پل‌های راه‌آهن دارای بالاست برابر با ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه است.
- میزان درصد استفاده از ظرفیت شتاب مجاز در پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ به ترتیب برابر ۲۶ و ۴۷ درصد است. همان‌طور که مشخص است پل کیلومتر ۲۳ به درصد کمتری از ظرفیت شتاب مجاز خود رسیده است. بدین ترتیب با افزایش طول دهانه حداکثر شتاب وارد شده به پل‌های قوسی بنایی کاهش می‌یابد که این موضوع نشان دهنده رفتار مناسب‌تر پل‌های قوسی بنایی با طول دهانه بیشتر جهت عبور قطار پرسرعت پردیس است.
- مقدار شتاب بیشینه در پل کیلومتر ۲۴ در اثر حرکت تمامی قطارهایی که دارای تنها یک واگن مسافری هستند، رخ داده است. با توجه به اشکال مختلف توزیع بار قطار، می‌توان نتیجه گرفت که اضافه شدن واگن‌ها سبب کاهش شتاب پل شده و به نوعی موجب تعدیل نوسان پل تحت اثر عبور قطار می‌شود. اما در پل کیلومتر ۲۳، تعدد واگن‌ها تأثیری در تعدیل مقدار شتاب بیشینه نداشته است و به طور کلی، شتاب در اثر عبور قطارهای تک تقریباً یکنواخت بوده است. با اعمال بار قطارهای چندگانه، پل کیلومتر ۲۳ با افزایش شتاب نسبت به قطارهای تک مواجه شد. بنابراین می‌توان این چنین گفت که افزایش طول قطار سبب بهبود رفتار پل‌های قوسی بنایی با دهانه کوچک‌تر می‌شود.
- با توجه به اینکه فرکانس ۱/۵۶ هرتز (فرکانس حرکت قطار پردیس) ناظر به شتاب ۰/۰۰۱ متر بر مجذور ثانیه بر روی نمودار میانگین داده‌ها در پل کیلومتر ۲۳ و کیلومتر ۲۴ است و بر روی هیچ یک از قله‌ها قرار نگرفته است، می‌توان نتیجه گرفت پدیده تشدید در هیچ یک از پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ بر اثر عبور قطارهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر رخ نمی‌دهد.
- با توجه به اینکه شتاب بیشینه بدست آمده در کلید قوس پل کیلومتر ۲۳ برابر ۰/۹۱ و در پل کیلومتر ۲۴ برابر ۱/۶۳ متر بر مجذور ثانیه است و هر دو کمتر از ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه هستند، می‌توان نتیجه گرفت حرکت این قطارها در تمامی هندسه‌های ارائه شده در سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت از لحاظ حفظ آسایش مسافران مناسب است. به طور کلی با مقایسه مقادیر بیشینه شتاب در دو پل کیلومتر ۲۳ و ۲۴ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش طول دهانه پل‌های قوسی بنایی، مقدار پاسخ شتاب پل کاهش یافته و این امر جهت حفظ آسایش مناسب‌تر خواهد بود.
- مطابق خیز بدست آمده، با افزایش طول دهانه‌ی پل‌ها، تغییر مکان در کلید قوس آنها افزایش می‌یابد که این مسئله می‌تواند زمینه آسیب به خطوط ریلی را فراهم می‌آورد و متعاقباً موجب ایجاد ضربه در اثر حرکت قطار روی پل‌ها می‌شود. اما از آنجا که شتاب بیشینه در اثر افزایش طول دهانه کاهش می‌یابد و بیشینه تغییر مکان ایجاد شده در این پل‌ها با دهانه‌ی بزرگتر خیلی کمتر از مقدار مجاز است، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر منفی افزایش طول دهانه چندان چشمگیر نیست و به طور کلی افزایش طول دهانه برای آسایش مسافران مناسب‌تر است.
- با توجه به اینکه قطارهای سرعت پایین موجود در کشور به صورت کلی از لوکوموتیوهای ۴ و ۶ محوره (شکل ۶) تشکیل شده‌اند و این قطارها با هندسه‌ی قطارهای پرسرعت پردیس (شکل ۸) کاملاً متفاوت هستند، مقایسه‌ی آنها با یکدیگر دشوار است. اما مطابق نتایج بدست آمده از تحلیل این پل‌ها تحت قطار ۶ محوره‌ی کم سرعت و قطارهای پرسرعت پردیس می‌توان چنین استنباط کرد که پل‌های قوسی بنایی به شتاب بسیار حساس‌تر هستند. حداکثر خیز محاسبه شده برای پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ تحت اثر حرکت لوکوموتیو ۶ محوره به ترتیب برابر با ۲/۴۱ میلی‌متر و ۰/۳۵ میلی‌متر در سرعت‌های ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت است. این درحالی است که برای قطارهای پردیس این مقدار به ترتیب برابر با ۱/۵۷ و ۰/۲۶۲ میلی‌متر بدست آمده است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که علی‌رغم

هندسه‌های متفاوت قطارهای کم سرعت و پرسرعت، خیز حداکثر پل تغییرات چندانی ندارد. همچنین حداکثر شتاب محاسبه شده برای پل‌های کیلومتر ۲۳ و ۲۴ تحت اثر حرکت لوکوموتیو ۶ محوره به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۸۱۴ متر بر مجذور ثانیه در سرعت‌های ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت است. این درحالی است که برای قطارهای پردیس این مقدار به ترتیب با ۰/۹۱ و ۱/۶۳ متر بر مجذور ثانیه است. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت رفتار پل‌های قوسی بنایی نسبت به شتاب تغییرات شدیدتری دارند و معیار تحلیل این سازه‌ها در برابر حرکت قطار بایستی شتاب پل‌ها باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در شبکه راه‌آهن کشور در حدود ۳۶۰۰۰ پل وجود دارد که از میان آنها در حدود ۳۷۰۰ پل قوسی بنایی همچنان در شبکه راه‌آهن کشور در حال سرویس‌دهی هستند. با توجه به قدمت بیش از ۸۰ ساله شبکه راه‌آهن کشور، این پل‌ها برای بارهای سرویس آن زمان (قطارهای با سرعت پایین) طراحی شده‌اند و در حال حاضر برای قطارهای با سرعت حداکثر ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در حال سرویس‌دهی هستند. با توجه به اهمیت قطارهای سریع‌السیر در صنعت ریلی هر کشور، بیشتر کشورهای توسعه یافته دارای شبکه راه‌آهن سریع‌السیر هستند و برای این منظور وجود این قطارها در کشور ضروری به نظر می‌رسد. به علت محدودیت‌های میدانی، زمانی و اقتصادی، حذف پل‌های قوسی بنایی در شبکه راه‌آهن 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، اما تاکنون مطالعه‌ای بر روی رفتار این پل‌ها تحت اثر حرکت قطارهای با سرعت بالا انجام نشده است. 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 بتنی غیرمسلح 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، این پل‌ها مورد ارزیابی دینامیکی قرار گرفتند. بسیاری از نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر توسط تحقیقات گذشته برای پل‌های عرشه‌ای نیز بدست آمده بود که این موضوع نشان می‌دهد پل‌های قوسی بنایی علی‌رغم رفتار بسیار پیچیده‌شان مشابه سایر پل‌ها رفتار می‌کنند. مطابق مرجع [۱۳] رفتار پل‌های قوسی بنایی به چهار عامل طول دهانه، تعداد دهانه، مشخصات مکانیکی مصالح و مشخصات هندسی پل وابسته است که از میان آنها طول دهانه از همه مهم‌تر است. بنابراین می‌توان گفت با توجه به حساسیت پل‌های قوسی بنایی به شتاب، با افزایش طول دهانه رفتار سازه‌ای آنها به علت کاهش شتاب بیشینه جهت عبور قطار پردیس بهتر می‌شود و همچنین افزایش طول قطار سبب بهبود رفتار پل‌های قوسی بنایی با دهانه کوچکتر می‌شود. بنابراین با استفاده از یک طول مناسب از قطارها می‌توان رفتار همه پل‌های قوسی بنایی را در محدود بسیار مناسبی حفظ کرد. تنها عاملی که می‌تواند موجب نگرانی در عملکرد ضعیف پل‌های قوسی بنایی شود، مربوط به وزن واگن‌ها است. با افزایش وزن هر واگن، جابجایی پل بیشتر می‌شود (افزایش وزن واگن‌ها تقریباً تاثیری بر شتاب پل‌ها ندارد) که این موضوع بایستی با احتیاط لحاظ شود. در نهایت، نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر بسیار امیدوارکننده است و حاکی از رفتار تقریباً مناسب پل‌های قوسی بنایی تحت اثر حرکت قطار پرسرعت پردیس با سرعت ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت و بار محوری تقریباً ۲۰ تنی است. بنابراین توصیه می‌شود در صورت استفاده از قطار پرسرعت پردیس در شبکه راه‌آهن کشور، اولاً بار محوری تحت هیچ عنوان افزایش نداشته باشد، ثانیاً فاصله بین محورها تغییر نکند و ثالثاً طول قطار افزایش یابد.

مراجع

- [۱] P. J. Fanning and T. E. Boothby, "Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges," Computers and Structures, vol. 79, pp. 2645-2662, 2001.
- [۲] J. M. C. Kishen, A. Ramaswamy, and C. S. Manohar, "Safety assessment of a masonry arch bridge: Field testing and simulations," Journal of Bridge Engineering, vol. 18, pp. 162-171, 2013.

- [۳] A. Bayraktar, T. Türker, and A. C. Altunişik, "Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 234-241, 2015.
- [۴] M. S. Marefat, E. Ghahremani-Gargary, and S. Ataei, "Load test of a plain concrete arch railway bridge of 20-m span," *Construction and Building Materials*, vol. 18, pp. 661-667, 2004.
- [۵] S. Ataei, M. Jahangiri Alikamar, and V. Kazemiashtiani, "Evaluation of axle load increasing on a monumental masonry arch bridge based on field load testing," *Construction and Building Materials*, vol. 116, pp. 413-421, 2016/07/30/ 2016.
- [۶] G. Frunzio, M. Monaco, and A. Gesualdo, "3D FEM analysis of a roman arch bridge," *Historical constructions*, pp. 591-598, 2001.
- [۷] A. Cavicchi and L. Gambarotta, "Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction," *Engineering Structures*, vol. 27, pp. 605-615, 2005.
- [۸] P. Kumar and N. M. Bhandari, "Non-linear finite element analysis of masonry arches for prediction of collapse load," *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, vol. 15, pp. 166-174, 2005.
- [۹] G. Milani and P. B. Lourenço, "3D non-linear behavior of masonry arch bridges," *Computers and Structures*, vol. 110-111, pp. 133-150, 2012.
- [۱۰] A. Moazam, N. Hasani, and M. Yazdani, "Three-dimensional modelling for seismic assessment of plain concrete arch bridges," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, vol. 0, pp. 1-36, 2018.
- [۱۱] V. Jahangiri, M. Yazdani, and M. S. Marefat, "Intensity measures for the seismic response assessment of plain concrete arch bridges," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, pp. 4225-4248, 2018/09/01 2018.
- [۱۲] M. S. Marefat, M. Yazdani, and M. Jafari, "Seismic assessment of small to medium spans plain concrete arch bridges," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-22, 2017.
- [۱۳] a. Mahmoudi Moazam, N. Hasani, and M. Yazdani, "3D simulation of railway bridges for estimating fundamental frequency using geometrical and mechanical properties," *Advabces in Computational Design*, vol. 2, pp. 257-271, 2017.
- [۱۴] L. Pelà, A. Aprile, and A. Benedetti, "Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges," *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 381-394, 2013.
- [۱۵] A. Mahmoudi Moazam, N. Hasani, and M. Yazdani, "Incremental dynamic analysis of small to medium spans plain concrete arch bridges," *Engineering Failure Analysis*, vol. 91, pp. 12-27, 9// 2018.
- [۱۶] S. Ataei and A. Miri, "Investigating dynamic amplification factor of railway masonry arch bridges through dynamic load tests," *Construction and Building Materials*, vol. 183, pp. 693-705, 2018.
- [۱۷] S. Ataei, A. Miri, and M. Tajalli, "Dynamic load testing of a railway masonry arch bridge: A case study of Babak Bridge," *Scientia Iranica*, vol. 24, pp. 1834-1842, 2017.
- [۱۸] S. Ataei, A. Miri, and M. Jahangiri, "Assessment of load carrying capacity enhancement of an open spandrel masonry arch bridge by dynamic load testing," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 11, pp. 1086-1100, 2017.
- [۱۹] R. Calçada, R. Delgado, F. Gabaldon, and J. Goicolea, "Dynamics of High-Speed Railway Bridges," ed: CRC Press/Belkema, London, 2009.
- [۲۰] J. Kwark, E. Choi, Y. Kim, B. Kim, and S. Kim, "Dynamic behavior of two-span continuous concrete bridges under moving high-speed train," *Computers & structures*, vol. 82, pp. 463-474, 2004.
- [۲۱] D. Gorbatiuk, G. Brandstetter, and J. Fink, "Investigations for Simplified Consideration of Train-Bridge-Interaction based on Railjet High-speed Train," *Procedia engineering*, vol. 156, pp. 116-123, 2016.
- [۲۲] M. Brunetti, J. Ciambella, L. Evangelista, E. Lofrano, A. Paolone, and A. Vittozzi, "Experimental results in damping evaluation of a high-speed railway bridge," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 3015-3020, 2017/01/01/ 2017.
- [۲۳] W. Lacarbonara and V. Colone, "Dynamic response of arch bridges traversed by high-speed trains," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, pp. 72-90, 2007/07/10/ 2007.

- [۲۴] N. Hu, G.-L. Dai, B. Yan, and K. Liu, "Recent development of design and construction of medium and long span high-speed railway bridges in China," *Engineering Structures*, vol. 74, pp. 233-241, 2014/09/01/ 2014.
- [۲۵] L. Jiang, X. Kang, C. Li, and G. Shao, "Earthquake response of continuous girder bridge for high-speed railway: A shaking table test study," *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 249-263, 2019/02/01/ 2019.
- [۲۶] K. Liu, Q. Su, P. Ni, C. Zhou, W. Zhao, and F. Yue, "Evaluation on the dynamic performance of bridge approach backfilled with fibre reinforced lightweight concrete under high-speed train loading," *Computers and Geotechnics*, vol. 104, pp. 42-53, 2018/12/01/ 2018.
- [۲۷] T. Wu, Y. Zou, Y. F. Chen, H. Guo, and Z. Yu, "Recent developments of high-speed railway bridges in China AU - He, Xuhui," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 13, pp. 1584-1595, 2017/12/02 2017.
- [۲۸] C. Y. Xia, H. Xia, and G. De Roeck, "Dynamic response of a train-bridge system under collision loads and running safety evaluation of high-speed trains," *Computers & Structures*, vol. 140, pp. 23-38, 2014/07/30 2014.
- [۲۹] H. Xia, G. De Roeck, N. Zhang, and J. Maeck, "Experimental analysis of a high-speed railway bridge under Thalys trains," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 268, pp. 103-113, 2003.
- [۳۰] H. Xia and N. Zhang, "Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains," *Computers & Structures*, vol. 83, pp. 1891-1901, 2005/09/01/ 2005.
- [۳۱] H. Xia, N. Zhang, and G. De Roeck, "Dynamic analysis of high speed railway bridge under articulated trains," *Computers & structures*, vol. 81, pp. 24 2467-2478, 2003.
- [۳۲] N. Zhang, H. Xia, and W. Guo, "Vehicle-bridge interaction analysis under high-speed trains," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 309, pp. 407-425, 2008/01/22/ 2008.
- [۳۳] P. Galvín, A. Romero, E. Moliner, and M. D. Martínez-Rodrigo, "Two FE models to analyse the dynamic response of short span simply-supported oblique high-speed railway bridges: Comparison and experimental validation," *Engineering Structures*, vol. 167, pp. 48-64, 2018/07/15/ 2018.
- [۳۴] L. Fryba, "A rough assessment of railway bridges for high speed trains," *Engineering Structures*, vol. 23, pp. 548-556, 2001/05/01/ 2001.
- [۳۵] J. Li and M. Su, "THE RESONANT VIBRATION FOR A SIMPLY SUPPORTED GIRDER BRIDGE UNDER HIGH-SPEED TRAINS," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 224, pp. 897-915, 1999/07/29/ 1999.
- [۳۶] K. Matsuoka, A. Collina, and M. Sogabe, "Dynamic simulation and critical assessment of a composite bridge in high-speed railway," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 3027-3032, 2017/01/01/ 2017.
- [۳۷] S. Schneider and S. Marx, "Design of railway bridges for dynamic loads due to high-speed traffic," *Engineering Structures*, vol. 174, pp. 396-406, 2018/11/01/ 2018.
- [۳۸] C. Somaschini, K. Matsuoka, and A. Collina, "Experimental analysis of a composite bridge under high-speed train passages," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 3071-3076, 2017/01/01/ 2017.
- [۳۹] W.-F. Chen, *Plasticity in reinforced concrete*: J. Ross Publishing, 2007.
- [۴۰] A. Committee and I. O. f. Standardization, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary," 2008.
- [۴۱] M. Liu and D. G. Gorman, "Formulation of Rayleigh damping and its extensions," *Computers & structures*, vol. 57, pp. 277-285, 1995.
- [۴۲] A. Bayraktar, A. C. Altuniik, F. Birinci, B. Sevim, and T. Türker, "Finite-element analysis and vibration testing of a two-span masonry arch bridge," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 24, pp. 46-52, 2010.
- [۴۳] O. m. Siemens Transportation System, Trainset Iran DH4-1 PARADISE, Project:Y.5213-12 / F.0532,2005.
- [۴۴] U. Code, "776-1R (1994), Loads to be considered in railway bridge design," fifth edition ed: International Union of Railway, 2006.