



University Of Qom



Investigating the Impact Factor of Cable Stayed Bridges under the Passage of Moving Load at Different Speeds

Hamidreza Dehghani¹ , Ehsan Dehghani² 

1. PhD candidate, Department of Structural Engineering., University of Qom, Qom, Iran. E-mail: hr.dehghani@stu.qom.ac.ir
2. Corresponding author, Associate professor, Department of Structural Engineering., University of Qom, Qom, Iran. E-mail: dehghani@qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 26 Aug 2023
Revised 08 Sep 2023
Accepted 09 Sep 2023

Keywords:
Cable-stayed Bridges,
Dynamic Analysis of
Moving Load,
Impact Factor,
Allowable Dynamic
Load (DLA),
Dynamic Amplification
Factor (DAF).

ABSTRACT

Due to developments in the field of fast transportation, increase in permitted speed and load capacity, moving loads can have significant effects on the dynamic forces of bridges. To consider the dynamic effect in the design of the structure, the dynamic impact factor is introduced as ratio of the dynamic response to the static response. Accurate evaluation of these coefficients helps in safe and economic designs for new bridges. However, the evaluation of the dynamic impact factor is difficult due to the vehicle-bridge interaction and the influence of many parameters that affect the dynamic impact factor, including the dynamic characteristics of the bridge and the vehicle, road surface conditions, vehicle speed, traffic conditions,. In this research, by applying live load of vehicles step by step and performing time history analysis, dynamic analysis under moving load has been done. Three different types of cable-stayed bridges with different spans and cable layouts have been investigated in the form of two-dimensional models. This study analyzes the impact coefficient of bending and shear forces of deck components and pylons, as well as the axial forces of cables, and the results are compared with the coefficients proposed in the design regulations. Also, the effect of changes in load passing speed on the dynamic impact factor in cable-stayed bridges has also been evaluated and studied. This research tries to improve and optimize the design and performance of cable-stayed bridges in order to deal with dynamic changes and increase the speed of loads.

Cite this article: Dehghani, Hamidreza., & Dehghani, Ehsan. (2023). Investigating the impact factor of cable stayed bridges under the passage of moving load at different speeds. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 163-179. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9813.1508>



بررسی ضریب ضربه پل‌های کابل‌ایستا تحت عبور بار متحرک با سرعت‌های مختلف

حمیدرضا دهقانی^۱، احسان دهقانی^۲ ✉

۱. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: hr.dehghani@stu.qom.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: dehghani@qom.ac.ir

چکیده

با توجه به تحولات در حوزه حمل‌ونقل سریع، افزایش سرعت مجاز و ظرفیت باری، بارهای متحرک می‌توانند تأثیرات چشم‌گیری بر نیروهای دینامیکی پل‌ها داشته باشند. برای مد نظر گرفتن اثر دینامیکی در طراحی سازه، ضریب ضربه دینامیکی به عنوان نسبت بی‌بعد پاسخ دینامیکی به پاسخ استاتیکی معرفی شده است. ارزیابی دقیق این ضرایب به طراحی‌های ایمن و اقتصادی برای پل‌های جدید کمک می‌کند. با این حال، ارزیابی ضریب تأثیر دینامیکی به دلیل مکانیزم پیچیده تعامل وسیله نقلیه- پل و تأثیر پارامترهای زیادی که بر ضریب تأثیر دینامیکی اثر می‌گذارند، از جمله ویژگی‌های دینامیکی پل و وسیله نقلیه، شرایط سطح جاده، سرعت وسیله نقلیه، شرایط ترافیکی و غیره، موجب پیچیدگی بسیاری در مسئله می‌شود. در این تحقیق با اعمال بار زنده وسایل نقلیه به صورت گام به گام و انجام تحلیل تاریخچه زمانی، تحلیل دینامیکی تحت بار متحرک صورت گرفته است. این مطالعه به صورت موردی سه نوع مختلف از پل‌های کابلی با دهانه‌ها و چیدمان کابل‌های متفاوت به صورت مدل‌های دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مطالعه به تحلیل ضریب ضربه نیروهای خمشی و برشی اجزای عرشه و پایلون‌ها و همچنین نیروهای محوری کابل‌ها می‌پردازد و نتایج حاصل از آن با ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های طراحی مقایسه می‌شوند. همچنین تأثیر تغییرات سرعت عبور بار بر ضریب ضربه دینامیکی در پل‌های کابل‌ایستا نیز مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته است. این پژوهش تلاش دارد تا با توجه به مطالعات انجام شده، بهبود و بهینه‌سازی در طراحی و عملکرد پل‌های کابلی ایستا را به‌منظور مقابله با تغییرات دینامیکی و افزایش سرعت بارها ارائه دهد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

کلیدواژه‌ها:

پل‌های کابل‌ایستا،
تحلیل دینامیکی بار متحرک،
ضریب ضربه (IM)،
بار دینامیکی مجاز (DLA)،
ضریب تقویت دینامیکی
(DAF).

استناد: دهقانی، حمیدرضا؛ و دهقانی، احسان. (۱۴۰۲). بررسی ضریب ضربه پل‌های کابل‌ایستا تحت عبور بار متحرک با سرعت‌های مختلف.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9813.1508>. ۱۶۳-۱۷۹. (۲)۹. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۲۰۲۳.

۱- مقدمه

راه‌حل‌های تحلیلی و عددی برای برخی مسائل خاص ارائه نموده‌اند [۱۱ و ۱۲]. در چند دهه گذشته، با پیشرفت رایانه‌ها با کارایی بالا و فناوری‌های محاسباتی، مدل‌سازی واقعی تر تعامل دینامیکی بین یک سیستم متحرک و پل امکان‌پذیر شده است. به‌طور خاص، یانگ^۴ و همکاران، راه‌حل جامعی برای پاسخ دینامیکی تیرهای ساده تحت تأثیر یک سری بارهای متحرک با سرعت بالا ارائه داده‌اند که در آن پدیده‌های تشدید و لغو شناسایی شده‌اند [۱۳]. همچنین، لی و نودا^۵، یک مدل محاسباتی پویا برای وسیله نقلیه با روش اجزای محدود پیشنهاد کرده‌اند [۱۴]. برخی از مطالعات نیز به تأثیر تغییرشکل‌های دینامیکی ناشی از بارهای متحرک بر ارتعاش پل‌ها پرداخته‌اند [۱۵-۱۷].

در مطالعات پیشین صورت گرفته، عوامل مختلف تأثیرگذار بر ضریب ضربه دینامیکی پل‌ها بررسی شده‌اند. عواملی همچون وضعیت سطح راه، طول دهانه پل و فرکانس طبیعی آن، نوع سازه پل، مشخصات مصالح پل و میرایی آن‌ها، سرعت عبور وسایل نقلیه، وزن وسیله نقلیه، تعداد محورهای وسایل نقلیه، تعداد وسایل نقلیه و نوع بار ترافیکی و نوع سیستم تعلیق وسایل نقلیه می‌باشد [۱۸-۴۰].

آیین‌نامه‌های طراحی، اعداد و روابط متفاوتی را برای ضریب ضربه پیشنهاد می‌دهند که تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. این امر، نشان از تأثیر متغیرهای متفاوت بر ضریب ضربه و عدم وجود اتفاق نظر در آیین‌نامه‌های کشورهای مختلف دارد. نشریه ۱۳۹ (آیین‌نامه بارگذاری پل‌های ایران)، (AASHTO (1992)، آیین‌نامه نیوزلند و ژاپن میزان ضریب ضربه را به طول پل مرتبط می‌کنند. در تمامی این آیین‌نامه‌ها با افزایش طول پل میزان ضریب ضربه دینامیکی کاهش می‌یابد. آیین‌نامه‌های استرالیا، اروپا و انگلستان رابطه ضریب ضربه را وابسته به نوع بار ترافیکی ارائه می‌دهند. همچنین

سیستم‌های کابلی به دلیل مزایای اقتصادی و سازه‌ای، اغلب برای پل‌های با دهانه‌های طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، پیشرفت‌های به‌وجود آمده در طراحی سازه‌ها و علم مهندسی مواد، موجب ساخت پل‌ها با استفاده از مقاطع با سطح مقطع کوچکتر شده است. این امر، باعث شده است که بارهای خارجی با بارهای خودوزن پل قابل مقایسه باشند و برای ارزیابی صحیح رفتار دینامیکی پل، نیاز به توصیف دقیقی از اثرات بارهای متحرک باشد. در عین حال، پیشرفت‌های جدید در سیستم‌های حمل‌ونقل سریع، افزایش محدوده سرعت مجاز و ظرفیت بار ترافیکی را ممکن ساخته است. در نتیجه، بارهای متحرک می‌تواند به‌طور چشم‌گیری بر نیروهای دینامیکی پل تأثیر بگذارند [۱ و ۲]. برای در نظر گرفتن اثر دینامیکی در طراحی سازه، اغلب از ضریب ضربه دینامیکی (DAF^1) استفاده می‌شود که به عنوان نسبت بی‌بعد پاسخ دینامیکی به پاسخ استاتیکی تعریف می‌شود. بدین منظور، می‌توان با استفاده از نتایج تجزیه و تحلیل استاتیکی و با در نظر گرفتن مقدار DAF سیستم، حداکثر پاسخ‌های سیستم را به‌راحتی محاسبه کرد. این رویکرد، معمولاً به عنوان روش تحلیل استاتیک معادل (ESA^2) شناخته می‌شود و به دلیل سادگی آن، به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی پاسخ دینامیکی توسط بسیاری از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳ و ۴].

ادبیات بسیاری برای بررسی رفتار دینامیکی پل به‌واسطه وسایل نقلیه حرکتی در چارچوب‌ها و مفروضات مختلف توسعه یافته است [۵-۱۰]. فریبا و تیموشنکو^۳، یک رویکرد جامع برای پاسخ دینامیکی سازه تیرهای ساده تحت تأثیر وسایل نقلیه حرکتی ارائه داده‌اند و

¹- Dynamic Amplification Factor

²- Equivalent Static Analysis

³- Fryba and Timoshenko

⁴- Yang

⁵- Lei and Noda

تحقیقات مرتبط با تأثیرات وسایل نقلیه بر پل‌های کابل‌ایستا در مقایسه با مطالعات مرتبط با زلزله و باد، کمتر می‌باشد [۴۱]. مشخصات هندسی پل از جمله شکل پایلون، چیدمان کابل‌ها، نوع عرشه، دهانه پل، فرکانس طبیعی پل و غیره از جمله عوامل مؤثر بر رفتار دینامیکی پل و میزان ضریب ضربه دینامیکی می‌باشند. از همین رو، مطالعات اخیر با تمرکز بر اثر این متغیرها به بررسی پاسخ دینامیکی سازه پرداخته‌اند [۱، ۵۱ و ۵۲]. پژوهشگران به بررسی اثرات ترافیک و بی‌نظمی‌های عبور وسایل نقلیه بر رفتار دینامیکی پرداخته‌اند [۴۴]. ژانگ^۷ و همکاران، ضریب ضربه پل‌های کابل‌ایستا را با در نظر گرفتن اثرات ارتعاش کابل‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند [۵۳]. وانگ و هوانگ^۸، با تحلیل عددی پل‌های کابلی تحت بار خودرو نشان داده‌اند که دهانه مرکزی پل‌های کابلی تأثیر قابل توجهی بر ضریب ضربه دارد؛ زیرا وجود یک لولا در وسط دهانه منجر به افزایش چشم‌گیری در مقدار ضریب ضربه می‌شود. همچنین تأثیر ترتیب کابل‌ها بر ضریب ضربه ناچیز می‌باشد. به علاوه، نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داده است که مقادیر ضریب ضربه بیش از ۰/۶ در برخی از نقاط پل، حتی در زیر جاده‌های خوب، مشاهده می‌شود [۵۴ و ۵۵]. با این وجود، نتایج آزمایشات میدانی بر یک پل کابلی در پرتغال نشان داد که حداکثر مقادیر ضریب ضربه به‌طور اساسی کمتر از ۰/۲ می‌باشد [۵۶].

دنگ^۹ با بررسی تمامی تاریخچه تحقیقات محاسبه ضریب ضربه تأکید می‌کند که هیچ اتفاق نظری در مورد رابطه بین ضریب ضربه و سرعت خودرو حاصل نشده است و مطالعات عمیق بیشتری برای آشکار کردن رابطه پیچیده بین ضریب ضربه و سرعت خودرو مورد نیاز است [۴۱].

آیین‌نامه‌های کانادا و چین نیز رابطه ضریب ضربه را وابسته به فرکانس ارتعاش آزاد پل ارائه می‌دهند. نکته قابل توجه دیگر در مورد ضریب ضربه ارائه‌شده در آیین‌نامه‌های مختلف، علی‌رغم وابستگی ضریب ضربه به متغیرهای متفاوت، رابطه محاسبه ضریب ضربه به صورت ساده و معمولاً وابسته به یک متغیر ارائه شده‌اند. آیین‌نامه (2012) AASHTO میزان ضریب ضربه را به‌صورت عدد ثابت و مرتبط با نوع المان و نوع حالت حدی طراحی ارائه می‌دهد. این ضریب برای طراحی مقاومتی تمامی اعضا برابر ۱/۳۳ می‌باشد. در واقع آیین‌نامه AASHTO با توجه به وجود متغیرهای تأثیرگذار متفاوت و عدم وجود رابطه مشخص مابین آن‌ها، اقدام به ارائه ضریبی کلی کرده است تا تمامی حالات مختلف پل‌ها را به خوبی پوشش دهد. با این وجود توصیه می‌شود تا ضریب ضربه ارائه شده جهت طراحی برای محاسبه نیروها و جابه‌جایی‌ها به صورت مجزا ارائه گردند [۴۱].

در زمینه پل‌های کابلی، تحقیقات مختلفی برای ارزیابی اثرات تقویتی ایجاد شده توسط بارهای متحرک پیشنهاد شده است [۴۲ و ۴۳]. محققان، ضریب ضربه دینامیکی پل‌های کابلی تحت بارهای راه‌آهن را با استفاده از مدل‌های مختلف وسایل نقلیه مورد بررسی قرار داده‌اند و اثرات ناشی از ناهمواری‌های تصادفی سطح جاده و تغییر شکل‌های طولانی‌مدت عرشه بتنی را ارزیابی نموده‌اند [۴۴ و ۴۵]. یانگ و فاندر^۶، با استفاده از مدل‌های عددی و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی کابل‌ها، رفتار دینامیکی پل تحت بارهای راه‌آهن را بررسی کرده‌اند [۴۶]. در ادامه، مطالعات بیشتری بر روی تعامل دینامیکی پل‌های کابلی با بارهای راه‌آهن بررسی شده‌اند، که در آن استراتژی‌هایی برای کاهش قله‌های رزونانس پل‌های کابلی که ممکن است توسط قطارهای پرسرعت برانگیخته شوند پیشنهاد شده است [۴۷-۵۰].

7- Zhang

8- Wang and Huang

9- Deng

6- Yang and Fonder

می‌دهد چنین تعریفی به صورتی ناچیز محافظه‌کارانه می‌باشد، بیشتر مطالعات و آیین‌نامه‌های طراحی به دلیل سهولت استفاده و تطابق با هدف طراحی از این تعریف استفاده می‌کنند [۳۳]. به علاوه، تعاریف معادلی به نام بار مجاز دینامیکی (DLA) و ضریب تشدید دینامیکی (DAF)، که برابر نسبت پاسخ دینامیکی حداکثر به پاسخ استاتیکی حداکثر می‌باشد نیز برای نمایش اثر تأثیر دینامیکی به کار می‌رود. ارتباط بین این سه عبارت مختلف به صورت $IM=DLA=DAF-1$ قابل بیان است.

۳- مبانی تحلیل تحت بار متحرک

اکثر نرم‌افزارهای تحلیل سازه، جهت انجام تحلیل بار متحرک از تحلیل خط تأثیر استفاده کرده و رفتار سازه را صرفاً به صورت استاتیکی تحلیل می‌کنند. از این‌رو، جهت انجام تحلیل تحت بار متحرک و محاسبه رفتار دینامیکی سازه، با استفاده از یکی از نرم‌افزارهای اجزای محدود، تحلیل بار متحرک با استفاده از یک تحلیل تاریخیچه زمانی شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، با اعمال چندین بار متمرکز با تابع زمانی مثلثی به صورت متوالی و انجام تحلیل تاریخیچه زمانی خطی، تحلیل دینامیکی تحت بار متحرک صورت می‌پذیرد. شکل ۱ نحوه تجزیه بار متحرک به چندین بار نقطه‌ای را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه در شکل، جهت اعمال بار متحرک به سازه، چندین بار نقطه‌ای به فواصل یکسان بر روی پل اعمال شده‌اند. هریک از بارها با الگوی بار مثلثی به صورت تاریخیچه زمانی به سازه اعمال و از روی سازه حذف می‌گردند. با تنظیم زمان اعمال هریک از بارها به سازه به صورت متوالی، بار نقطه‌ای به صورت متحرک از روی سازه عبور داده می‌شود. در شکل ۱، صرفاً الگوی اعمال ۳ بار نقطه‌ای وارد بر سازه نشان داده شده است. در شکل ۲، فلوجارت روش پیشنهادی جهت انجام تحلیل دینامیکی تحت بار متحرک مشاهده می‌شود.

با توجه به پیشینه تحقیقات بیان شده، مطالعات بر روی ضریب ضربه دینامیکی پل‌های کابل ایستا و اثر تغییر سرعت عبور بار بر ضریب ضربه دینامیکی ناقص می‌باشد. از این‌رو در پژوهش حاضر، به صورت موردی با بررسی سه نوع پل کابلی با دهانه‌ها و چیدمان کابل‌های متفاوت، به ارزیابی ضریب ضربه لنگرهای خمشی و نیروهای برشی اعضای عرشه، پایلون و نیروهای محوری کابل‌ها پرداخته و با ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های طراحی مقایسه شده است. همچنین با تغییر سرعت عبور بار، اثر افزایش سرعت نیز بر ضریب ضربه دینامیکی در پل‌های کابل ایستا مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- تعریف ضریب ضربه دینامیکی

ارتعاشات ناشی از وسایل نقلیه در پل‌های جاده‌ای یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌های مهندسی پل است که مدت‌هاست شناخته شده است. اکنون به‌خوبی معلوم است که وسایل نقلیه در حال حرکت، تأثیرات دینامیکی را بر پل‌ها ایجاد می‌کنند که منجر به افزایش اثر بار استاتیکی می‌شوند. برای در نظر گرفتن این تأثیر، معمولاً در طراحی، یک ضریب تأثیر دینامیکی (IM) معرفی می‌شود و بار مؤثر زنده کل (LL) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

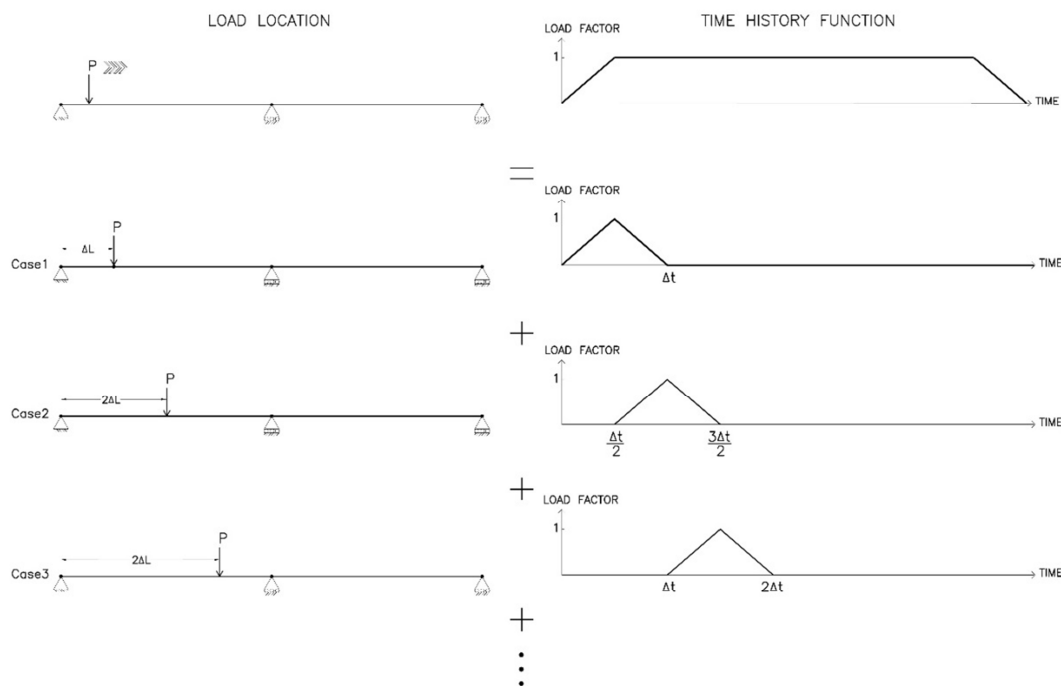
$$LL = (1 + IM) \times R_{sta} \quad (1)$$

که R_{sta} برابر اثر بار استاتیکی می‌باشد.

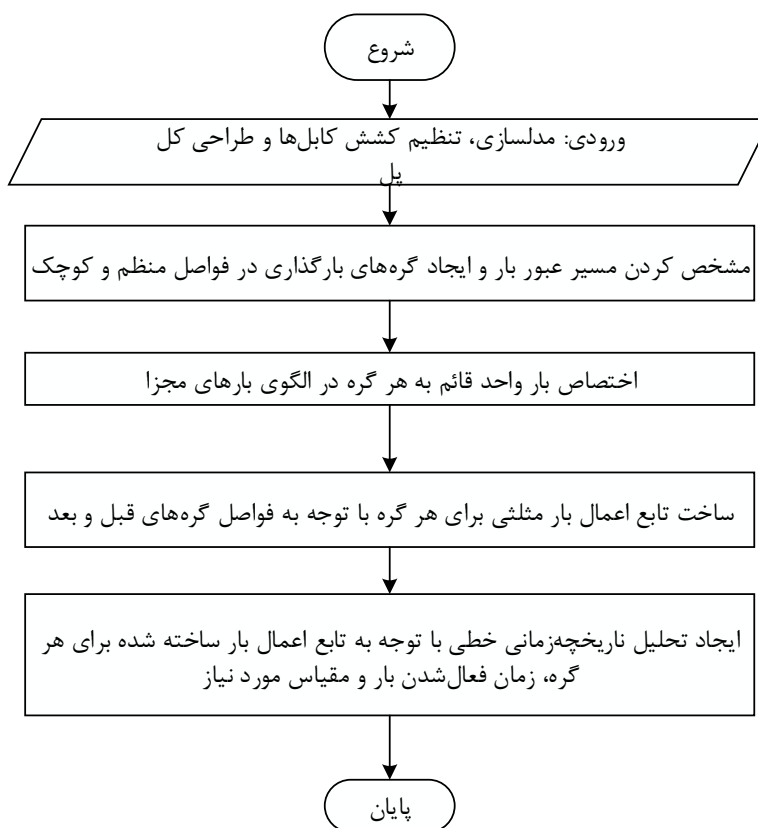
به‌طور کلی، IM براساس پیشینه پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$IM = \frac{R_{dyn} - R_{sta}}{R_{sta}} \quad (2)$$

که در آن R_{sta} و R_{dyn} به ترتیب پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی حداکثر در یک مکان خاص در پل است. این تعریف، جهت سادگی، حداکثر پاسخ‌های هر دو نوع استاتیکی و دینامیکی را بدون در نظر گرفتن هم‌زمانی آن‌ها در نظر می‌گیرد. هرچند نتایج تحقیقات نشان



شکل ۱- تجزیه بار متحرک به چندین بار متمرکز در فواصل مشخص



شکل ۲- فلوجارت روش انجام تحلیل دینامیکی تحت بار متحرک

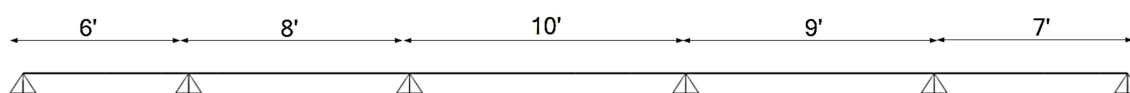
به صورت زیر از روی پل‌ها عبور داده شده است (شکل ۳) [۵۷]. همچنین جهت ساده‌سازی روند تحلیل از اعمال بار یکنواخت قبل و بعد از کامیون صرف نظر شده است.

در پژوهش حاضر، بار سه خط کامیون ۴۰ تن بدون فاصله طولی از یکدیگر به صورت سه بار نقطه‌ای متمرکز با فاصله محورهای معرفی شده در آیین‌نامه نشریه ۱۳۹

سرعت عبور، به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده و هر یک از مدل‌ها تحت سرعت‌های عبور ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متر بر ثانیه تحلیل و ضریب ضربه دینامیکی آن‌ها محاسبه شده است.

۳-۲- صحت‌سنجی روش ارائه شده

جهت صحت‌سنجی روش انجام تحلیل دینامیکی تحت بار متحرک ارائه شده، از مدل ارائه شده در تحقیق مرجع [۵۸] استفاده شده است. این مدل، یک تیر پیوسته ۵ دهانه بوده که طول هر یک از دهانه‌های آن از چپ به راست به ترتیب برابر ۶، ۸، ۱۰، ۹ و ۷ فوت می‌باشد. مدل مورد نظر با استفاده از المان‌های قابی ساخته شده و تمامی تکیه‌گاه‌ها از نوع مفصلی می‌باشند. شکل ۴، نمای کلی مدل اجزای محدود ساخته شده را نشان می‌دهد.

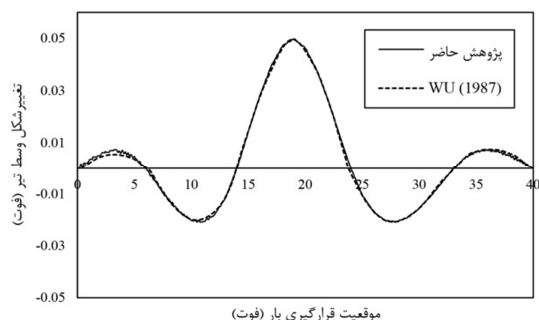


شکل ۴- نمای طولی مدل اجزای محدود ساخته شده

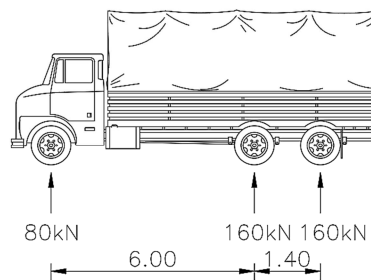
مختلف و چیدمان کابل‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- فرکانس مودهای ارتعاشی مدل ساخته‌شده و مدل مرجع [۵۸]

فرکانس (Hz)	مدل ساخته‌شده	مدل مرجع
f1	۲۷/۴	۲۷/۵
f2	۳۵/۸	۳۵/۹
f3	۳۹/۹	۴۰/۳
f4	۴۸/۳	۴۹/۰
f5	۵۱/۷	۵۱/۹



شکل ۵- تغییر شکل وسط دهانه تیر میانی نسبت به محل قرارگیری بار متحرک



شکل ۳- بار کامیون اعمال شده به سازه

۳-۱- سرعت عبور وسیله نقلیه

سرعت عبور وسایل نقلیه در نوع رفتار دینامیکی سازه می‌تواند اثرگذار باشد. در روش ارائه شده جهت انجام تحلیل دینامیکی تحت بار متحرک با تغییر در الگوی بار می‌توان اثر سرعت عبور بار را در نظر گرفت. بدین ترتیب طبق کمیت‌های تعریف شده در شکل ۱، سرعت عبور وسیله نقلیه برابر با $V = \frac{2\Delta L}{\Delta t}$ می‌باشد. در این پژوهش

در ادامه در جدول ۱، جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی انجام شده، میزان فرکانس مودهای ۱ تا ۵ مدل ساخته شده با نتایج تحقیق محققان مرجع [۵۸] ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هر دو مدل دارای فرکانس مودهای ارتعاشی مشابهی می‌باشند. همچنین یک بار متمرکز به میزان ۲۰۰۰۰ پوند با سرعت ۱۰ فوت بر ثانیه از روی تیر عبور داده شده است. در شکل ۵، نتایج تغییر شکل وسط دهانه میانی ناشی از نتایج پژوهش مرجع و مدل ساخته شده با بارگذاری شبیه‌سازی شده تاریخچه زمانی ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، نتایج تحلیل انجام شده و مقایسه آن با نتایج پژوهش مرجع، نشان از دقت مناسب نتایج روش تحلیل دینامیکی بار متحرک ارائه شده دارد.

۳-۳- معرفی مطالعه موردی و روش تحلیل

در این پژوهش ۳ پل کابل ایستا با طول دهانه‌های

مختلف آن‌ها طراحی شده‌اند. مشخصات مصالح مورد استفاده تمامی پل‌ها یکسان بوده و در جدول ۲ ارائه شده است.

برای هر پل به صورت مجزا ضریب ضربه دینامیکی تحت عبور بار کامیون با سرعت‌های مختلف محاسبه شده است. کشش کابل‌های تمامی پل‌ها تنظیم شده و اجزای

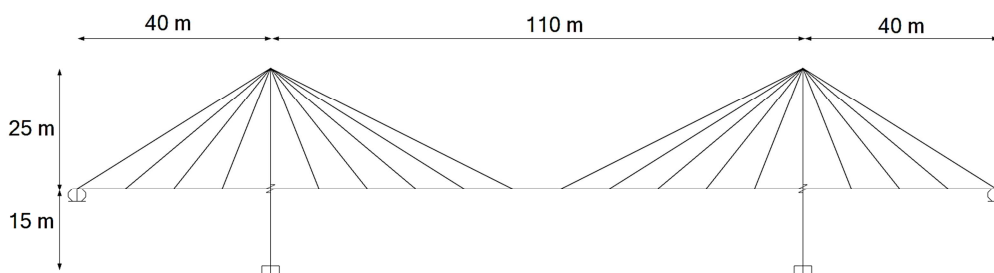
جدول ۲- مشخصات مصالح

وزن واحد حجم (ton/m^3)	ضریب پوآسون (ν)	مقاومت مشخصه فشاری بتن (f'_c) (MPa)	تنش تسلیم (s_y) (MPa)	مدول الاستیسیته (E) (GPa)	نوع مصالح
۷/۸۵	۰/۳	---	۳۶۰	۲۰۰	فولاد
۲/۵	۰/۲	۳۰	---	۲۵/۷	بتن

المان‌های قابی و کابل‌ها با المان کابل انجام شده است. در ادامه جزئیات هریک از مدل‌ها بیان شده است.

۳-۳-۱- مدل ۱

شکل ۶، هندسه پل کابلی مدل شماره ۱ را نشان می‌دهد. دهانه اصلی پل، ۱۱۰ متر و دهانه‌های جانبی هر کدام ۴۰ متر می‌باشد. ارتفاع پایلون ۴۰ متر از روی فونداسیون و ۲۵ متر از روی عرشه می‌باشد. برای عرشه پل، مقطع بتنی مستطیلی به ضخامت ۰/۸ و عرض ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین مقطع پایلون به صورت مقطع لوله بتنی با قطر ۳ و ضخامت ۰/۳۰ متر تعریف شده است [۵۹].



شکل ۶- نمای طولی پل شماره ۱

تعداد دهانه‌های پل ۳ عدد و طول دهانه اصلی میانی ۱۶۰ متر می‌باشد.

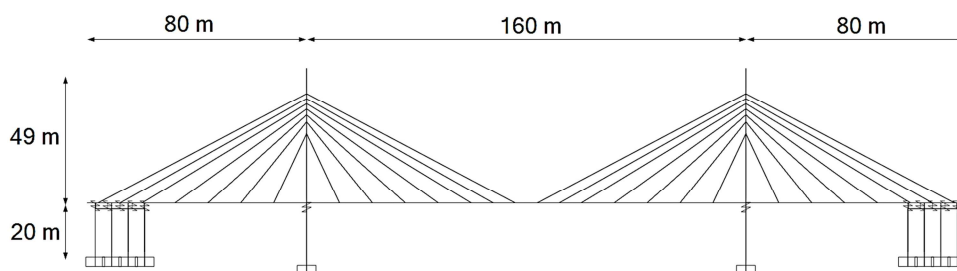
دال بتنی روی تیرها دارای ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، تیرهای فولادی عرضی به ارتفاع ۱/۷۵ و شاهتیرهای اصلی به ارتفاع ۲ متر می‌باشند. ارتفاع پایلون حدود ۷۰ متر از روی فونداسیون و حدود ۴۹ متر از روی عرشه می‌باشد. شکل ۷، نمای کلی پل را به صورت شماتیک

۳-۳-۲- مدل ۲

این پل از نوع کابل ایستا به طول کلی ۳۲۰ متر می‌باشد. عرشه پل از دو شاهتیر فولادی که با دال فوقانی به صورت کامپوزیت عمل می‌کنند تشکیل شده است. پایلون‌های الماسی شکل از دو بخش فولادی در تراز فوقانی عرشه و بتنی در تراز زیر عرشه تشکیل شده‌اند.

همچنین شاه‌تیرهای اصلی و تیرهای فرعی عرشه از نوع آ شکل می‌باشند.

نشان می‌دهد. مقطع پیلون‌ها در زیر عرشه از نوع بتنی و مستطیلی شکل با ابعاد حداکثر 6×4 متر و در بالای عرشه از نوع فولادی با ابعاد حداکثر $1/5 \times 0/75$ متر می‌باشد.

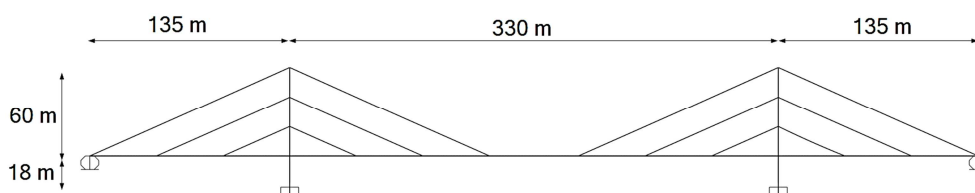


شکل ۷- نمای طولی پل شماره ۲

کابل است که به شکل موازی چیده شده‌اند. دهانه اصلی پل 330 متر و دهانه‌های جانبی هر کدام 135 متر می‌باشد. طول هر قطعه تیر 15 متر و تنها قطعه نهایی (کلید) دارای طول 30 متر می‌باشد. شکل ۸، نمای کلی پل را نشان می‌دهد.

۳-۳-۳- مدل ۲

سومین مدل بررسی شده در این پژوهش، مدل مرجع ارائه شده در پژوهش وانگ و همکاران می‌باشد [۶۰]. این نمونه یک پل کابلی چنگ متقارن با سه دهانه می‌باشد. این پل دارای دو ستون به ارتفاع 78 متر و 12



شکل ۸- نمای طولی پل شماره ۳

جهت انجام محاسبات ضربه ضربه دینامیکی، هریک از پل‌ها به صورت جداگانه تحت تأثیر عبور یک کامیون با استفاده از روش‌های دینامیکی و استاتیکی تجزیه و تحلیل شده‌اند. به منظور بررسی اثر سرعت عبور بار بر ضربه ضربه دینامیکی، چهار حالت مختلف با سرعت‌های 20 ، 30 ، 40 و 50 متر بر ثانیه بر روی سازه اعمال گردیده است. با توجه به تفاوت‌های مشاهده شده در ضربه ضربه دینامیکی به‌ازای نیروهای مختلف، مقادیر ضربه ضربه برای خمش و برش در المان‌های قابی (شامل عرشه و پیلون) و همچنین نیروهای محوری در المان‌های کابل به طور جداگانه محاسبه شده‌اند. همچنین، به دلیل تغییرات نیروی اعمالی در هر نقطه در زمان عبور بار متحرک، میزان نیروها در هر لحظه به طور دینامیکی محاسبه شده و در نتیجه، میزان ضربه ضربه دینامیکی

در جدول ۳، فرکانس مودهای ارتعاشی هریک از مدل‌های ساخته شده ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل‌های مورد بررسی، بازه مناسبی از سختی‌های متفاوت پل‌های کابلی را در بر می‌گیرند.

جدول ۳- فرکانس مودهای ارتعاشی مدل‌های مورد بررسی

فرکانس (Hz)	مدل شماره ۱	مدل شماره ۲	مدل شماره ۳
f1	0/8	0/6	0/4
f2	1/2	0/8	0/4
f3	2/0	1/2	0/7
f4	2/2	1/3	0/8
f5	2/3	1/4	1/0

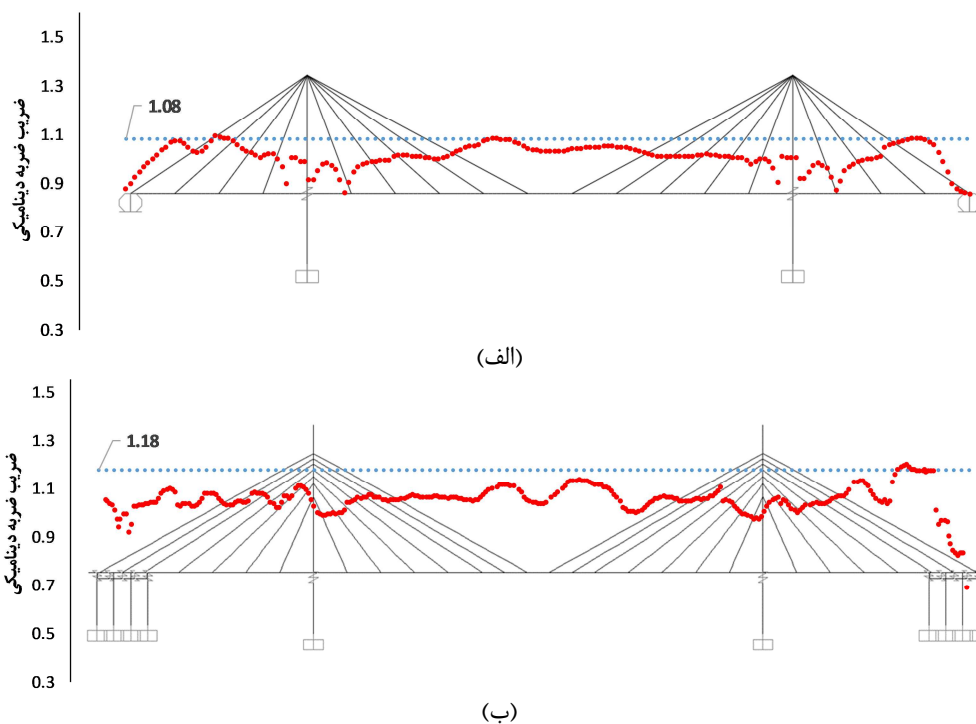
۴- محاسبه ضربه ضربه دینامیکی

با توجه به آن که سرعت طرح عبور وسایل نقلیه در اکثر بزرگراهها حدود ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد. در ادامه ضرایب ضربه به دست آمده با عبور سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در هریک از پل‌ها به صورت دقیق ارائه شده و با ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های طراحی مختلف مقایسه گردیده است.

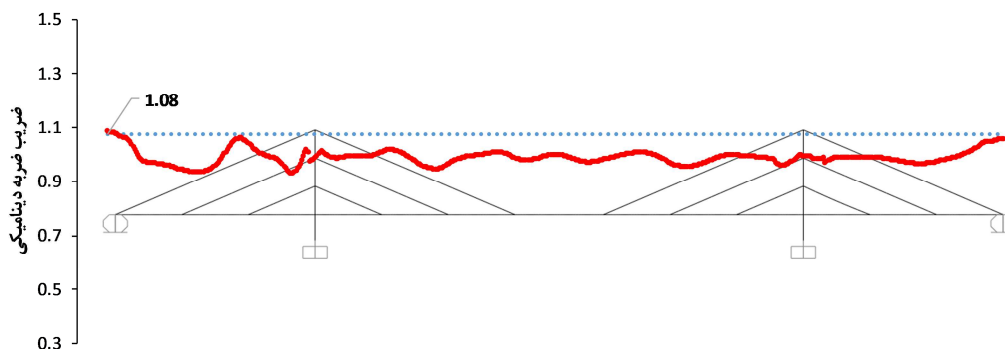
شکل ۹، ضرایب ضربه دینامیکی حداکثر مقدار خمش نقاط مختلف عرشه پل تحت عبور بار با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهند. همچنین خط پوش ۹۹ درصد مقادیر به دست آمده نیز نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب ضربه به دست آمده در اکثر نقاط عرشه بجز نواحی روی تکیه‌گاه مابین عدد ۱ تا ۱/۱ می‌باشد. همچنین نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که طول دهانه پل، تغییر چیدمان کابل‌ها، تغییر فرکانس طبیعی پل و مابقی مشخصات تغییر یافته مابین پل‌های مورد بررسی، تأثیر چندانی در ضریب ضربه حداکثر مقدار خمش اعضای عرشه تحت سرعت عبور مورد نظر نداشته‌اند.

برای حداکثر مطلق مقدار نیروها (که معمولاً نیروهای طراحی‌کننده را نمایان می‌کند) محاسبه شده است. همچنین، با توجه به اهمیت اختلاف نیروهای ایجاد شده ناشی از بار زنده در کنترل‌های مرتبط با اثرات خستگی، میزان ضریب ضربه دینامیکی این اختلاف نیروها نیز به صورت جداگانه محاسبه گردیده است.

با توجه به تفاوت رفتاری المان‌های مختلف پل‌های کابل ایستا، ضریب ضربه محاسبه شده برای المان‌های عرشه، پیلون و کابل‌ها به صورت مجزا ارائه شده تا اثرات دینامیکی وارده به پل را بهتر بتوان تحلیل کرد. همچنین جهت ارائه یک ضریب ضربه برای هر قسمت، می‌بایست حداکثر ضریب ضربه به دست آمده در تمامی نقاط آن قسمت به عنوان ضریب ضربه پیشنهادی ارائه شود. شایان ذکر است جهت حذف داده‌های پرت ناشی از خطاهای تحلیل اجزا محدود، ۱ درصد از بیشینه داده‌های به دست آمده از نتایج حذف شده و حداکثر مقدار ۹۹ درصد داده‌ها به عنوان ضریب ضربه به دست آمده ارائه گردیده است. روش استفاده شده جهت حذف داده‌های پرت با عنوان روش صدک ۹۹ شناخته می‌شود [۶۱].



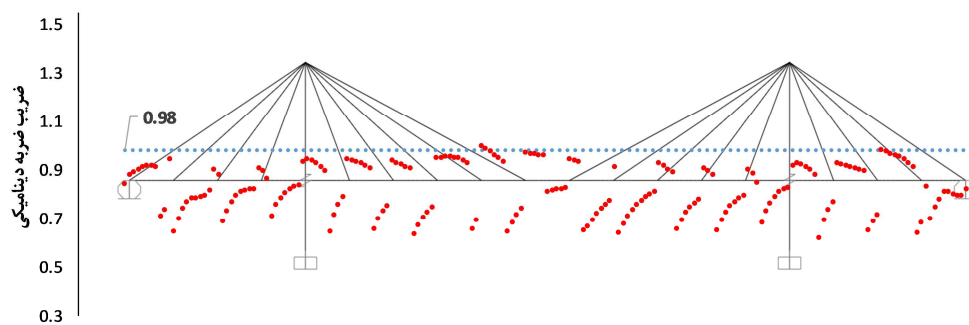
شکل ۹- ضریب ضربه دینامیکی حداکثر لنگر خمشی نقاط مختلف عرشه پل (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (پ) شماره ۳



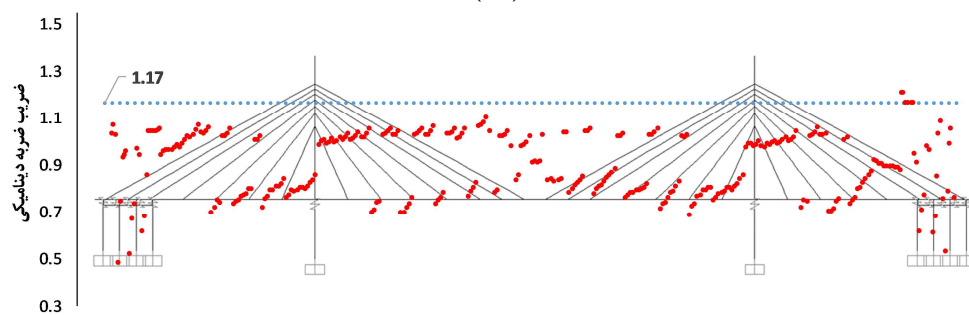
(پ)
شکل ۹- ادامه

نقاط مختلف عرشه (برش طراحی عضو) می‌باشد، در برخی نقاط مقدار برش مثبت و برخی نقاط مقدار برش منفی حاکم بر طرح شده و مقدار ضریب ضربه متناظر با آن ارائه شده است. از همین رو ضرایب ضربه از روند خاصی پیروی نکرده و دارای پرش می‌باشند.

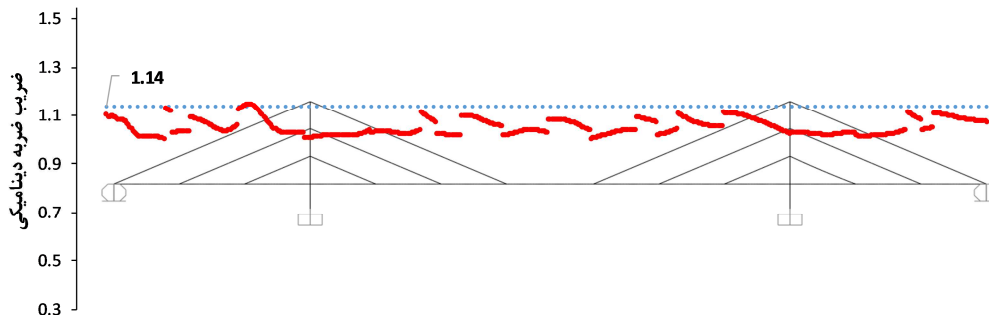
شکل ۱۰، ضرایب ضربه دینامیکی حداکثر مقدار برش نقاط مختلف عرشه پل تحت عبور بار با سرعت ۳۰ متربرثانیه را نشان می‌دهند. همچنین خط پوش ۹۹ درصد مقادیر به دست آمده نیز نشان داده شده است. با توجه به آن که ضرایب ضربه ارائه شده میزان حداکثر برش



(الف)



(ب)

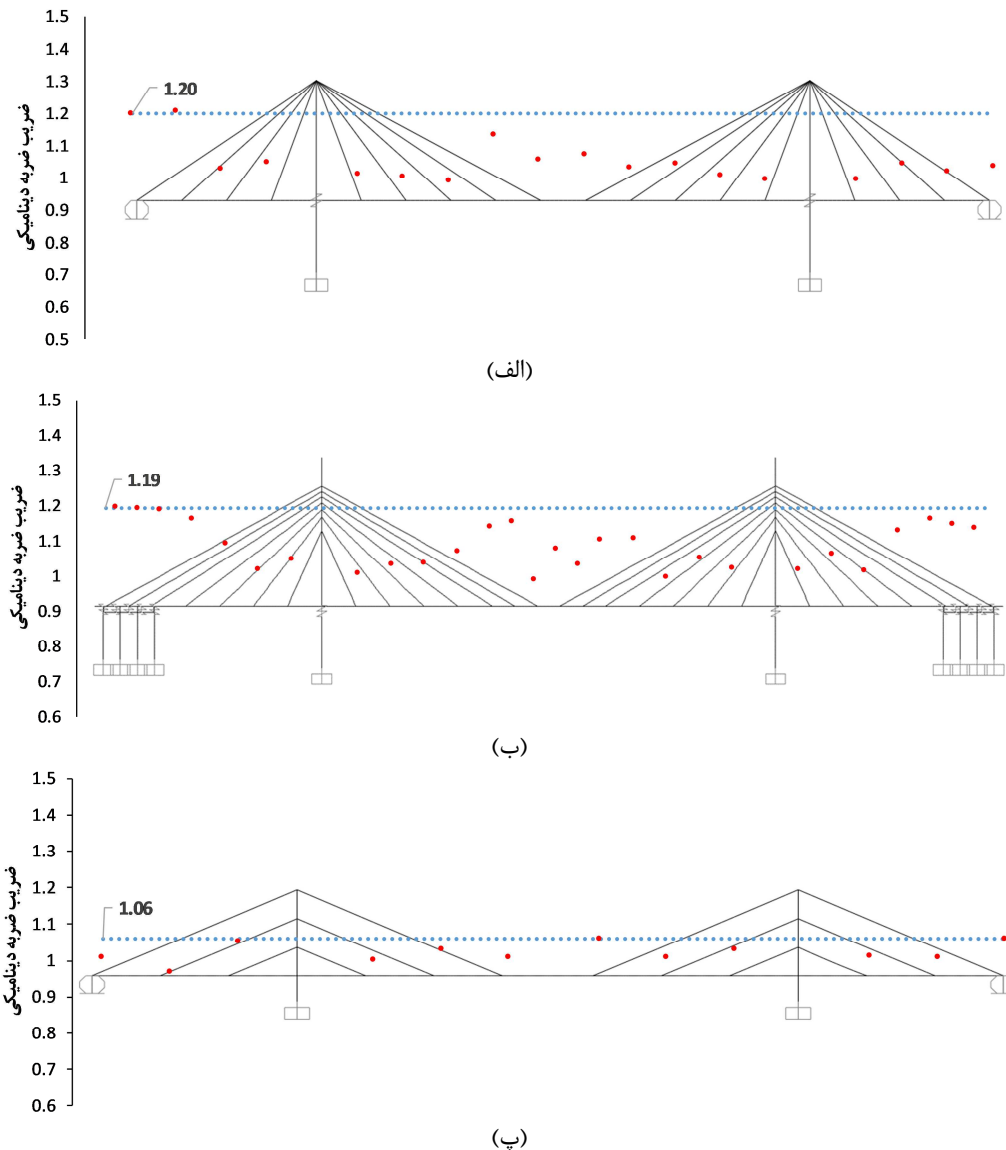


(پ)

شکل ۱۰- ضریب ضربه دینامیکی حداکثر نیروی برشی نقاط مختلف عرشه پل (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (پ) شماره ۳

ثانیه را نشان می‌دهند. همچنین خط پوش ۹۹ درصد مقادیر به دست آمده نیز نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب ضربه کابل‌های پشت‌بند از مابقی کابل‌ها بیشتر بوده و اثر بارهای دینامیکی بر روی آن‌ها بیشتر می‌باشد.

همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضریب ضربه نیروی برشی اعضای عرشه برای پل شماره ۱ کوچکتر از ۱ بدست آمده است. شکل ۱۱، ضرایب ضربه دینامیکی حداکثر مقدار نیروی محوری کابل‌ها تحت عبور بار با سرعت ۳۰ متر بر



شکل ۱۱- ضریب ضربه دینامیکی حداکثر نیروی محوری کابل‌های پل (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (پ) شماره ۳

دینامیکی ارائه شده در آیین‌نامه‌های مختلف از پژوهش دنگ و همکاران برداشت شده است [۴۱]. جهت مقایسه دقیق‌تر ضرایب محاسبه شده، ضریب ضربه حداکثر به دست آمده در اجزای مختلف پل به صورت پررنگ نشان داده شده‌اند.

در جدول ۴، ضرایب ضربه نیروهای حاکم بر طراحی (خمش و برش) و اختلاف حداکثر و حداقل نیروی به وجود آمده در اعضای مختلف (عرشه، پیلون و کابل) به صورت مجزا ارائه شده است. همچنین ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های مختلف نیز جهت مقایسه با ضرایب به دست آمده بیان شده‌اند. روابط ضریب ضربه

جدول ۴- مقایسه ضرایب ضربه به‌دست آمده از تحلیل با ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های طراحی

مدل ۳	مدل ۲	مدل ۱	
۱/۰۸	۱/۱۸	۱/۰۸	حداکثر لنگر خمشی عرشه
۱/۰۴	۱/۲۲	۱/۱۲	اختلاف حداکثر و حداقل لنگر خمشی عرشه
۱/۱۴	۱/۱۷	۰/۹۸	حداکثر نیروی برشی عرشه
۱/۱۲	۱/۱۹	۰/۹۴	اختلاف حداکثر و حداقل نیروی برشی عرشه
۰/۹۴	۱/۱۸	۱/۶۹	حداکثر لنگر خمشی پیلون
۰/۹۷	۱/۲۱	۱/۶۶	اختلاف حداکثر و حداقل لنگر خمشی پیلون
۰/۹۸	۱/۱۶	۱/۲۷	حداکثر نیروی برشی پیلون
۰/۹۸	۱/۲۵	۱/۵۲	اختلاف حداکثر و حداقل نیروی برشی پیلون
۱/۰۶	۱/۱۹	۱/۲۰	حداکثر نیروی محوری کابل‌ها
۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۲۵	اختلاف حداکثر و حداقل نیروی محوری کابل‌ها
۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۰	AASHTO (1992)
۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۳	AASHTO (2012)
۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۲۰	Ontario
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	Chinese (1989)
۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	Chinese (2004)
۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۰	New Zealand
۱/۳۰	۱/۳۰	۱/۳۰	Australian
۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۴۰	European (M)
۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۲۰	European (V)
۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	British
۱/۰۵	۱/۱۰	۱/۱۳	Japanese

در آیین‌نامه‌ها که به‌صورت یک متغیره می‌باشند برای پل‌های کابلی دارای خطا می‌باشند. از این رو، ضرایب ارائه شده در آیین‌نامه‌هایی همانند AASHTO 2012 که به صورت ضریب ثابت می‌باشند، مناسب‌تر به نظر می‌رسند. از سوی دیگر، با توجه به تفاوت‌های قابل توجه در ضرایب ضربه به‌دست آمده آلمان‌ها و نوع نیروهای مختلف پل، ارائه ضرایب مختلف برای آلمان‌ها و نیروها به صورت مجزا در آیین‌نامه‌ها پیشنهاد می‌گردد.

۴-۱- بررسی اثر سرعت عبور بار بر ضریب ضربه دینامیکی

همانگونه که در تاریخچه تحقیقات ذکر شد، هیچ اتفاق نظری در مورد رابطه بین ضریب ضربه و سرعت

همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های مختلف دارای تفاوت‌های فاحش با یکدیگر می‌باشند. با این وجود، ضرایب ضربه به‌دست آمده از تحلیل، مقادیری مابین ضرایب ارائه شده آیین‌نامه‌های مختلف می‌باشد. ضریب ضربه به‌دست آمده برای پیلون مدل ۱ تا ۱/۶۹ نیز افزایش یافته و از محدوده پیشنهادی ضرایب آیین‌نامه‌ها خارج می‌باشد. یکی از دلایلی که می‌تواند منجر به این موضوع شده باشد، نوع چیدمان پنکه‌ای کابل‌های این پل می‌باشد که این موضوع می‌بایست در تحقیقات جامع‌تری مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که ضریب ضربه پل‌های کابلی صرفاً وابسته به طول پل و یا فرکانس طبیعی آن نمی‌باشد و اکثر رابطه‌های ارائه شده

سرعت‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متر بر ثانیه از روی سازه عبور داده شده‌اند و ضریب ضربه دینامیکی آن‌ها در هر سه پل مورد بررسی، استخراج و مقایسه شده است.

خودرو حاصل نشده است و مطالعات عمیق بیشتری برای آشکار کردن رابطه پیچیده بین ضریب ضربه و سرعت خودرو مورد نیاز است. از این رو، جهت بررسی اثر سرعت عبور بار بر پاسخ دینامیکی پل‌های کابل ایستا، بار زنده با

جدول ۵- ضرایب ضربه به دست آمده تحت سرعت‌های عبور بار متفاوت

سرعت عبور بار (متر بر ثانیه)					
۵۰	۴۰	۳۰	۲۰		
۱/۲۵	۱/۳۱	۱/۰۸	۱/۰۴	مدل ۱	حداکثر لنگر خمشی عرشه
۱/۴۹	۱/۲۹	۱/۱۸	۱/۰۶	مدل ۲	
۱/۱۵	۱/۱۱	۱/۰۷	۱/۰۳	مدل ۳	
۱/۳۳	۱/۳۹	۱/۱۲	۱/۰۵	مدل ۱	اختلاف حداکثر و حداقل لنگر خمشی عرشه
۱/۶۵	۱/۴۳	۱/۲۲	۱/۱۹	مدل ۲	
۱/۲۱	۱/۱۵	۱/۰۹	۱/۰۴	مدل ۳	
۰/۹۸	۱/۰۷	۰/۹۸	۱/۰۰	مدل ۱	حداکثر نیروی برشی عرشه
۱/۱۷	۱/۱۲	۱/۱۷	۱/۰۴	مدل ۲	
۱/۰۴	۱/۰۴	۰/۹۹	۱/۰۲	مدل ۳	
۰/۹۷	۱/۰۸	۰/۹۴	۰/۹۸	مدل ۱	اختلاف حداکثر و حداقل نیروی برشی عرشه
۱/۳۴	۱/۱۲	۱/۱۹	۱/۰۶	مدل ۲	
۱/۱۰	۱/۰۴	۱/۰۲	۱/۰۱	مدل ۳	
۴/۱۵	۳/۲۵	۱/۶۹	۱/۱۲	مدل ۱	حداکثر لنگر خمشی پایلون
۱/۸۹	۱/۳۹	۱/۱۸	۱/۰۷	مدل ۲	
۱/۲۳	۱/۱۱	۱/۰۷	۱/۰۳	مدل ۳	
۴/۱۵	۴/۲۱	۱/۶۶	۱/۲۷	مدل ۱	اختلاف حداکثر و حداقل لنگر خمشی پایلون
۱/۸۱	۱/۲۹	۱/۲۱	۱/۰۷	مدل ۲	
۱/۱۴	۱/۱۶	۱/۰۸	۱/۰۴	مدل ۳	
۲/۵۶	۲/۱۷	۱/۲۷	۱/۱۱	مدل ۱	حداکثر نیروی برشی پایلون
۱/۸۷	۱/۴۷	۱/۱۶	۱/۰۷	مدل ۲	
۱/۲۵	۱/۱۹	۱/۲۱	۱/۰۵	مدل ۳	
۳/۰۹	۳/۴۱	۱/۵۲	۱/۲۶	مدل ۱	اختلاف حداکثر و حداقل نیروی برشی پایلون
۲/۰۳	۱/۶۴	۱/۲۵	۱/۰۸	مدل ۲	
۱/۲۷	۱/۱۸	۱/۱۶	۱/۰۴	مدل ۳	
۱/۴۷	۱/۴۴	۱/۲۰	۱/۰۸	مدل ۱	حداکثر نیروی محوری کابل‌ها
۱/۷۵	۱/۵۳	۱/۱۹	۱/۰۸	مدل ۲	
۱/۲۵	۱/۲۱	۱/۰۶	۱/۰۳	مدل ۳	
۱/۶۹	۱/۶۴	۱/۲۵	۱/۱۰	مدل ۱	اختلاف حداکثر و حداقل نیروی محوری کابل‌ها
۲/۱۰	۱/۵۹	۱/۲۸	۱/۱۲	مدل ۲	
۱/۴۰	۱/۲۵	۱/۱۲	۱/۰۵	مدل ۳	

دلیل، ضرایب ارائه شده در آیین‌نامه‌هایی مانند AASHTO 2012 که به صورت ضریب ثابت در نظر گرفته شده‌اند، به نظر مناسب‌تر می‌رسند.

۲- با توجه به تفاوت‌های قابل توجه در ضرایب ضربه به دست آمده برای المان‌ها و انواع مختلف نیروهای پل، توصیه می‌شود که ضرایب مختلف برای هر المان و نیرو به صورت جداگانه در آیین‌نامه‌ها ارائه شوند.

۳- به طور کلی ضرایب ضربه به دست آمده در کابل‌ها بیشتر از المان‌های دیگر بوده است. با توجه به رفتار ترد این المان‌ها و اهمیت فراوان آن‌ها در پایداری پل‌های کابل ایستا، انجام مطالعات دقیق‌تر و ارائه ضرایب بزرگتر نسبت به المان‌های دیگر در آیین‌نامه‌های طراحی پیشنهاد می‌گردد.

۴- ضرایب ضربه به دست آمده از اختلاف تنش‌های ایجاد شده در اعضای پل ناشی از عبور بار زنده در بسیاری از موارد بزرگتر از ضریب ضربه نیروی حداکثر پل شده است. این امر، نشان از اهمیت ارائه ضرایب ضربه مجزا برای کنترل‌های خستگی دارد.

۵- به طور کلی، با افزایش سرعت عبور بار متحرک، ضرایب ضربه محاسبه شده نیز در مدل‌ها، المان‌ها و نیروهای مختلف افزایش یافته است. با این وجود با رد شدن فرکانس بار عبوری از فرکانس تشدید سازه در برخی از موارد ضریب ضربه سازه کاهش یافته است.

همانگونه که مشاهده می‌شود، به صورت کلی با افزایش سرعت عبور بار متحرک، ضرایب ضربه به دست آمده نیز در مدل‌ها، المان‌ها و نیروهای مختلف نیز افزایش می‌یابند. با این وجود، در برخی از موارد در سرعت‌های بالاتر و با رد کردن فرکانس تشدید سازه، ضرایب ضربه دینامیکی به دست آمده اندکی کاهش یافته است. هرچند نتایج به دست آمده نمایانگر افزایش ضرایب ضربه با افزایش سرعت عبور بار می‌باشند، با این وجود، نرخ افزایش ضرایب ضربه به دست آمده و اثر پدیده تشدید و رابطه آن با سرعت عبور بار نیازمند مطالعات دقیق‌تری می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام مطالعه موردی بر روی سه پل کابل ایستا با دهانه‌ها و چیدمان کابل‌های مختلف به بررسی ضریب ضربه دینامیکی تحت اثر عبور بار متحرک پرداخته شد و نتایج به دست آمده با ضرایب پیشنهادی آیین‌نامه‌های مختلف طراحی پل مقایسه گردید. همچنین اثر عبور سرعت بار بر ضریب ضربه دینامیکی نیز با انجام تحلیل‌های مجزا مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مهمترین نتایج به دست آمده از این پژوهش ارائه می‌گردد:

۱- ضرایب ضربه به دست آمده برای پل‌های مختلف در این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب ضربه در پل‌های کابلی به طول یا فرکانس طبیعی پل محدود نمی‌شود و بسیاری از روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها که به صورت یک‌متغیره مدل می‌شوند، برای پل‌های کابلی دقت کافی ندارند. به همین

References

- [1] Bruno, D., Greco, F., & Lonetti, P. (2008). Dynamic impact analysis of long span cable-stayed bridges under moving loads. *Engineering structures*, 30(4), 1160-1177. doi: 10.1016/j.engstruct.2007.07.001
- [2] Yang, Y. B. (2022). *Research on Vehicle-Bridge Interaction Dynamics since 1990s*. in IABSE Congress Nanjing 2022 - Bridges and Structures: Connection, Integration and Harmonisation, Report.
- [3] Highway, A. A. O. S. & Officials, T. (2020). *LRFD bridge design specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [4] Chao, Z., Hong, H., Kaiming, B., & Xueyuan, Y. (2020). Dynamic amplification factors for a system with multiple-degrees-of-freedom. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 19, 363-375. doi: 10.1007/s11803-020-0567-9

- [5] Yau, J. D., & Urushadze, S. (2024). Resonance reduction for linked train cars moving on multiple simply supported bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 568, 117963. doi: **10.1016/j.jsv.2023.117963**
- [6] Gharad, A. M., & Sonparote, R. S. (2023). Study of dynamic impact factors of two-track continuous and integral railway bridge subjected to high-speed loads. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 23(3), 19-24. doi: **10.56748/ejse.234203**
- [7] Gharad, A. M., & Sonparote, R. S. (2021). Evaluation of vertical impact factor coefficients for continuous and integral railway bridges under high-speed moving loads. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 20, 495-504. doi: **10.1007/s11803-021-2034-7**
- [8] Sheng, G. G., Han, Y., Zhang, Z., & Zhao, L. (2023). Control of nonlinear vibration of beams subjected to moving loads using tuned mass dampers. *Acta Mechanica*, 234(7), 3019-3036. doi: **10.1007/s00707-023-03544-z**
- [9] Dong, Y., Zhang, W., Shamsabadi, A., Shi, L., & Taciroglu, E. (2023). A Vehicle–Bridge Interaction Element: Implementation in ABAQUS and Verification. *Applied Sciences*, 13(15), 8812. doi: **10.3390/app13158812**
- [10] Safari Honar, F., Mohammadi Dehcheshmeh, E., Broujerdian, V., & Torabi, M. (2022). Nonlinear Dynamic Behavior of Three-Dimensional Moment Steel Frames and Dual System under Vehicle Impact. *Civil Infrastructure Researches*, 7(2), 21-31. doi: **10.22091/cer.2021.7270.1287** [In Persian]
- [11] Frýba, L. (1999). *Vibration of solids and structures under moving loads*. Thomas Telford.
- [12] Timoshenko, S. P., & Young, D. H. (1965). *Theory of structures*. New York: McGraw-Hill.
- [13] Yang, Y. B., Liao, S. S., & Lin, B. H. (1995). Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams. *Journal of Structural Engineering*, 121(11), 1644-1650. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:11(1644)**
- [14] Lei, X., & Noda, N. A. (2002). Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *Journal of sound and vibration*, 258(1), 147-165. doi: **10.1006/jsvi.2002.5107**
- [15] Roeder, C. W., Barth, K. E., & Bergman, A. (2004). Effect of live-load deflections on steel bridge performance. *Journal of Bridge Engineering*, 9(3), 259-267. doi: **10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:3(259)**
- [16] Warburton, G. B. (1976). *The dynamical behaviour of structures: structures and solid body mechanics series*. Elsevier.
- [17] Wiriyachai, A., Chu, K. H., & Garg, V. K. (1982). Bridge impact due to wheel and track irregularities. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 108(4), 648-666. doi: **10.1061/JMCEA3.0002851**
- [18] Deng, L., Cai, C. S., & Barbato, M. (2011). Reliability-based dynamic load allowance for capacity rating of prestressed concrete girder bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 16(6), 872-880. doi: **10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000178**
- [19] Ding, L., Hao, H., & Zhu, X. (2009). Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 323(3-5), 826-848. doi: **10.1016/j.jsv.2009.01.051**
- [20] González, A., Cantero, D., & O'Brien, E. J. (2011). Dynamic increment for shear force due to heavy vehicles crossing a highway bridge. *Computers & structures*, 89(23-24), 2261-2272. doi: **10.1016/j.compstruc.2011.08.009**
- [21] Kim, C. W., Kawatani, M., & Kwon, Y. R. (2007). Impact coefficient of reinforced concrete slab on a steel girder bridge. *Engineering Structures*, 29(4), 576-590. doi: **10.1016/j.engstruct.2006.05.021**
- [22] Cantieni, R. (1983). Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland. *Rep*, 211.
- [23] Li, H. (2005). *Dynamic response of highway bridges subjected to heavy vehicles*. The Florida State University.
- [24] Huang, D. (2012). Vehicle-induced vibration of steel deck arch bridges and analytical methodology. *Journal of Bridge Engineering*, 17(2), 241-248. doi: **10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000243**
- [25] Samaan, M., Kennedy, J. B., & Sennah, K. (2007). Impact factors for curved continuous composite multiple-box girder bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 12(1), 80-88. doi: **10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:1(80)**
- [26] Schwarz, M., & Laman, J. A. (2001). Response of prestressed concrete I-girder bridges to live load. *Journal of Bridge Engineering*, 6(1), 1-8. doi: **10.1061/(ASCE)1084-0702(2001)6:1(1)**
- [27] Wang, T. L., Huang, D., & Shahawy, M. (1992). Dynamic response of multigirder bridges. *Journal of Structural Engineering*, 118(8), 2222-2238. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:8(2222)**
- [28] Azimi, H., Galal, K., & Pekau, O. A. (2011). A modified numerical VBI element for vehicles with constant velocity including road irregularities. *Engineering Structures*, 33(7), 2212-2220. doi: **10.1016/j.engstruct.2011.03.012**
- [29] Hag-Elsafi, O., Albers, W. F., & Alampalli, S. (2012). Dynamic analysis of the Bentley Creek Bridge with FRP deck. *Journal of Bridge Engineering*, 17(2), 318-333. doi: **10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000244**

- [30] Paultre, P., Chaallal, O., & Proulx, J. (1992). Bridge dynamics and dynamic amplification factors—a review of analytical and experimental findings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 260-278. doi: **10.1139/192-032**
- [31] Azimi, H., Galal, K., & Pekau, O. A. (2013). A numerical element for vehicle–bridge interaction analysis of vehicles experiencing sudden deceleration. *Engineering Structures*, 49, 792-805. doi: **10.1016/j.engstruct.2012.12.031**
- [32] Chang, D., & Lee, H. (1994). Impact factors for simple-span highway girder bridges. *Journal of Structural Engineering*, 120(3), 704-715. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(704)**
- [33] González, A., O'Brien, E. J., Cantero, D., Li, Y., Dowling, J., & Žnidarič, A. (2010). Critical speed for the dynamics of truck events on bridges with a smooth road surface. *Journal of Sound and Vibration*, 329(11), 2127-2146. doi: **10.1016/j.jsv.2010.01.002**
- [34] Yin, X., Fang, Z., Cai, C. S., & Deng, L. (2010). Non-stationary random vibration of bridges under vehicles with variable speed. *Engineering Structures*, 32(8), 2166-2174. doi: **10.1016/j.engstruct.2010.03.019**
- [35] Ashebo, D. B., Chan, T. H., & Yu, L. (2007). Evaluation of dynamic loads on a skew box girder continuous bridge Part II: Parametric study and dynamic load factor. *Engineering structures*, 29(6), 1064-1073. doi: **10.1016/j.engstruct.2006.07.013**
- [36] 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: **10.1016/j.ijimpeng.2007.07.003**
- [37] Deng, L., & Cai, C. S. (2010). Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges. *Engineering Structures*, 32(1), 21-31. doi: **10.1016/j.engstruct.2009.08.013**
- [38] Kwasniewski, L., Wekezer, J., Roufa, G., Li, H., Ducher, J., & Malachowski, J. (2006). Experimental evaluation of dynamic effects for a selected highway bridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(3), 253-260. doi: **10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:3(253)**
- [39] Harris, N. K., O'Brien, E. J., & González, A. (2007). Reduction of bridge dynamic amplification through adjustment of vehicle suspension damping. *Journal of Sound and Vibration*, 302(3), 471-485. doi: **10.1016/j.jsv.2006.11.020**
- [40] Szurgott, P., Wekezer, J., Kwasniewski, L., Siervogel, J., & Ansley, M. (2011). Experimental assessment of dynamic responses induced in concrete bridges by permit vehicles. *Journal of Bridge Engineering*, 16(1), 108-116. doi: **10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000119**
- [41] Deng, L., Yu, Y., Zou, Q., & Cai, C. S. (2015). State-of-the-art review of dynamic impact factors of highway bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 20(5), 04014080. doi: **10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000672**
- [42] Zhang, W. M., Chen, J., Tian, G. M., & Lu, X. F. (2023, July). Analytical algorithm for the full-bridge response of hybrid cable-stayed suspension bridges under a horizontal transverse live load. In *Structures*, 53, 132-148. doi: **10.1016/j.istruc.2023.04.048**
- [43] Park, J., Yoon, J., Park, C., & Lee, J. (2023). Studying the Cable Loss Effect on the Seismic Behavior of Cable-Stayed Bridge. *Applied Sciences*, 13(9), 5636. doi: **10.3390/app13095636**
- [44] Au, F. T. K., Wang, J. J., & Cheung, Y. K. (2001). Impact study of cable-stayed bridge under railway traffic using various models. *Journal of Sound and Vibration*, 240(3), 447-465. doi: **10.1006/jsvi.2000.3236**
- [45] 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. doi: **10.1016/S0141-0296(01)00119-5**
- [46] Yang, F., & Fonder, G. A. (1998). Dynamic response of cable-stayed bridges under moving loads. *Journal of engineering mechanics*, 124(7), 741-747. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:7(741)**
- [47] Ji, Y., & Kim, Y. J. (2019). State-of-the-art review of bridges under rail transit loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 172(6), 451-466. doi: **10.1680/jstbu.18.00005**
- [48] Yau, J. D., & Yang, Y. B. (2004). Vibration reduction for cable-stayed bridges traveled by high-speed trains. *Finite elements in analysis and design*, 40(3), 341-359. doi: **10.1016/S0168-874X(03)00051-9**
- [49] Zhang, N., Xia, H., & Guo, W. (2008). Vehicle–bridge interaction analysis under high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 309(3-5), 407-425. doi: **10.1016/j.jsv.2007.07.064**
- [50] Mu, D., Gwon, S. G., & Choi, D. H. (2016). Dynamic responses of a cable-stayed bridge under a high speed train with random track irregularities and a vertical seismic load. *International Journal of Steel Structures*, 16, 1339-1354. doi: **10.1007/s13296-016-0104-x**
- [51] Zaman, M., Taheri, M. R., & Khanna, A. (1996). Dynamic response of cable-stayed bridges to moving vehicles using the structural impedance method. *Applied mathematical modelling*, 20(12), 877-889. doi: **10.1016/S0307-904X(96)00094-7**
- [52] Zhu, Z., Wang, L., Davidson, M. T., Harik, I. E., & Patil, A. (2019). Nonlinear dynamic analysis of long-span cable-stayed bridges with train–bridge and cable coupling. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11, 271-283. doi: **10.1007/s40091-019-0229-1**

- [53] Zhang, H., & Xie, X. (2011). Dynamic responses of cable-stayed bridges to vehicular loading including the effects of the local vibration of cables. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 12(8), 593-604. doi: **10.1631/jzus.A1000351**
- [54] Huang, D., Wang, T. L., & Shahawy, M. (1992). Impact analysis of continuous multigirder bridges due to moving vehicles. *Journal of Structural Engineering*, 118(12), 3427-3443. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:12(3427)**
- [55] Huang, D., & Wang, T. L. (1992). Impact analysis of cable-stayed bridges. *Computers & Structures*, 43(5), 897-908. doi: **10.1016/0045-7949(92)90304-I**
- [56] Calçada, R., Cunha, A., & Delgado, R. (2005). Analysis of traffic-induced vibrations in a cable-stayed bridge. Part I: Experimental assessment. *Journal of Bridge Engineering*, 10(4), 370-385. doi: **10.1061/(ASCE)1084-0702(2005)10:4(370)**
- [57] *Bridge Loading Regulations (Publication 139)*. Management and Planning Organization of Iran. [In Persian]
- [58] Wu, J. S., Lee, M. L., & Lai, T. S. (1987). The dynamic analysis of a flat plate under a moving load by the finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(4), 743-762. doi: **10.1002/nme.1620240407**
- [59] Fathali, M. A., Dehghani, E., & Hoseini Vaez, S. R. (2020). An approach for adjusting the tensile force coefficient in equivalent static cable-loss analysis of the cable-stayed bridges. In *Structures*, 25, 720-729. doi: **10.1016/j.istruc.2020.03.054**
- [60] Wang, P. H., Tang, T. Y., & Zheng, H. N. (2004). Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods. *Computers & Structures*, 82(4-5), 329-346. doi: **10.1016/j.compstruc.2003.11.003**
- [61] Wilcox, R. R. (2011). *Introduction to robust estimation and hypothesis testing*. Academic press.