



# تعیین ضریب ضربه دینامیکی در پل‌های فولادی راه‌آهن با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان سرعت حرکت و نسبت فاصله محورهاى قطار به طول دهانه

سجاد احمد حمیدی<sup>۱</sup>، فرهاد دانشجو<sup>۲</sup>

چکیده

در روش متداول تحلیل پل، بار ترافیکی به عنوان یک بار استاتیکی لحاظ گردیده و با اعمال یک ضریب به نام ضریب ضربه افزایش می‌یابد. ضریب ضربه در آئین‌نامه‌های موجود صرفاً تابعی از طول دهانه یا فرکانس اول ارتعاشی پل می‌باشد. در این تحقیق اثرات پارامترهای مختلف مانند سرعت حرکت، فاصله محورهاى قطار، تعداد محورها و طول دهانه پل بر پاسخ‌های دینامیکی پل‌های فولادی راه‌آهن و مقدار ضریب ضربه بررسی شده است. برای این منظور پاسخ‌های دینامیکی و ضریب ضربه برای چهار پل با طول دهانه ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر در محدوده سرعت‌های ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت و فاصله محورهاى ۱۳ تا ۲۴ متر محاسبه گردیده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی نشان می‌دهد که در بسیاری از شرایط، برای ضریب ضربه مقادیری بیش از مقادیر پیشنهادی آئین‌نامه‌ها به دست می‌آید و در نتیجه روابط پیشنهادی آئین‌نامه‌ها برای ضریب ضربه کفایت نمی‌کند. همچنین نشان داده شده است که سرعت حرکت قطار بر مقدار ضریب ضربه موثر می‌باشد به نحوی که با افزایش سرعت مقادیر ضریب ضربه افزایش چشمگیری دارد. نسبت فاصله محورهاى قطار به طول دهانه پل یکی دیگر از پارامترهای موثر بر ضریب ضربه است به نحوی که مقدار ضریب ضربه برای نسبت‌های کمتر از یک و بیشتر از یک متفاوت می‌باشد. تعداد محورهاى قطار صرفاً در شرایط تشدید بر ضریب ضربه موثر می‌باشد. در این تحقیق برای ضریب ضربه روابطی با در نظر گرفتن سرعت حرکت، فاصله محورهاى قطار و طول دهانه پل ارائه شده است.

کلمات کلیدی :

ضریب ضربه، تحلیل دینامیکی، پل‌های فولادی، قطار، بارهای متحرک

## Determination of Impact Factor for Steel Railway Bridges Considering Simultaneous Effects of Vehicle Speed and Ratio of Axle Distance to Span Length

S.A.Hamidi, F.Daneshjoo

### ABSTRACT

In the traditional method of bridge design, traffic loads are considered as static loads which are increased by the application of Impact Factor. In current standards, the impact factor is only a function of span length or first flexural natural frequency of the bridge. In this research, the effects of different parameters like vehicle speed, axle distance, number of axles and span length on dynamic responses of steel railway bridges and impact factor are considered. For this purpose, dynamic responses and impact factors are calculated for four simple span steel bridges with 10, 15, 20 and 25 meter length. The vehicle speed varies from 100 to 400 km/h and axle distances from 13 to 24 meter. The results indicate that the impact factors calculated from dynamic analysis in various conditions are greater than those suggested in standards like AASHTO and AREMA so the quantities of impact factors in standards are not sufficient. The impact factor is increased rapidly as the vehicle speed is increased. The results also indicate that the ratio of axle distance to span length affects the quantity of impact factor. The impact factor differs for ratios smaller or greater than one. The number of axles affects the impact factor only in resonance conditions. In this research some formulas are proposed for impact factor considering different parameters such as span length, vehicle speed and axle distance.

### Key words:

Impact factor, Dynamic analysis, Steel bridges, Train, Moving loads

۱. دانشجوی دکتری سازه دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران S\_hamidi@modares.ac.ir

۲. دانشیار سازه دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران danesh\_f@modares.ac.ir

پاسخ پل‌ها به بارهای دینامیکی یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در ایمنی و طول عمر مفید پل‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه بارهای دینامیکی به اشکال مختلفی بر سازه پل وارد می‌شود، توجه به هر یک از این بارها، خصوصیات آنها و نحوه اثرگذاری آنها بر پل در بهبود شیوه‌های طراحی، افزایش قابلیت اطمینان و اقتصادی‌تر شدن طرح‌ها کمک می‌نماید [۲]. یکی از مواردی که در بحث دینامیک پل‌ها مورد توجه می‌باشد، نحوه اثرگذاری بارهای ترافیک بر پاسخ‌المان‌های مختلف پل می‌باشد.

معمولاً وقتی باری با سرعت کم بر سازه‌ای اعمال می‌گردد، فرض می‌شود که شتاب وارد بر جرم تمام اجزاء و قطعات سازه صفر است و بارها به صورت آهسته و تدریجی بر قطعات وارد می‌گردند و در هر مرحله از وارد شدن بار، زمان کافی موجود است تا تعادل بین نیروهای مؤثر و نیروهای ارتجاعی مقاوم داخلی برقرار گردد. در این صورت تحلیل استاتیکی برای این سازه‌ها کفایت می‌کند. ولی برخی از بارها به علت سرعت اعمال آنها، باعث ایجاد واکنش‌های دینامیکی در سازه می‌گردند و دیگر روش‌های متداول تحلیل استاتیکی سازه پاسخگوی نیازهای طراحی سازه نمی‌باشد [۱].

علی‌رغم آنکه بیش از یک قرن از پیدایش حمل و نقل ریلی می‌گذرد و از آن زمان تاکنون بحث اثرات بار متحرک بر پل‌ها مورد توجه بوده است، ولی به علت توسعه و پیشرفت روز افزون قطارها و افزایش سرعت و ظرفیت آنها توجه به اثرات دینامیکی بارهای ریلی بر پل‌ها همچنان حائز اهمیت می‌باشد.

امروزه در کشورهای بسیاری خطوط راه آهن سریع‌السیار توسعه یافته است. این مهم برخی مسائل سازه‌ای را نیز با خود به همراه داشته است که مرتبط با طراحی پل‌ها و سازه‌ها در مسیر راه آهن می‌باشد. بحث جدیدی که فراروی محققان قرار گرفته است نحوه اثرگذاری بارهای متحرک ناشی از حرکت قطارها بر روی پل‌ها می‌باشد. از آغاز فعالیت سیستم حمل و نقل ریلی، مسائل مربوط به

پاسخ پل‌ها به بارهای متحرک مورد توجه بوده است و در طراحی مد نظر قرار می‌گرفته است. در کارهای که توسط تیموشنکو، Fryba و سایر محققان در این مورد انجام گرفته است توجه عمده به پدیده پاسخ یک تیر ساده به حرکت یک بار منفرد بر روی آن بوده است. بر اساس این تحقیقات استانداردهای مختلف از جمله AREMA و Euro Code برای طراحی پل‌های راه آهن، اثر دینامیکی بار متحرک را با ارائه ضریب ضربه، که نشان‌دهنده تفاوت پاسخ دینامیکی پل نسبت به پاسخ استاتیکی آن به بار متحرک است، در نظر گرفتند [۶].

در سال‌های اخیر تحقیقاتی برای بررسی صحت این روابط و مقایسه آن با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است. برخی از این تحقیقات بر عدم کفایت روابط موجود در آیین‌نامه‌های طراحی برای ضریب ضربه دلالت دارند.

Zhang و همکاران در سال ۲۰۰۲ تحقیقی را برای تعیین ضریب ضربه برای پل‌های کامپوزیت فولادی-بتنی انجام دادند. آنها ۱۲۰ نمونه مختلف پل را که از تغییر پارامترهای مختلف مانند طول دهانه، تعداد شاهتیرها، تعداد خطوط ترافیک و . . . به دست آمده بود در محیط نرم‌افزاری ABAQUS مورد تحلیل قرار دادند. برای مدل سازی بار ترافیک در این تحقیق از تعدادی بار متمرکز متحرک استفاده شده است. در این تحقیق از اندرکنش پل و وسیله نقلیه به علت کم بودن جرم وسیله نقلیه نسبت به جرم پل صرف نظر گردیده است. با توجه به نتایج عددی حاصل از این تحقیق، نشان داده شده است که روابط ضریب ضربه برای پاسخ‌های مختلف پل (لنگر، عکس‌العمل تکیه‌گاه‌ها و افت) برخلاف پیشنهاد آشتو یکسان نمی‌باشد. برای پل‌های کامپوزیت ضریب ضربه پیشنهادی آشتو در مورد لنگر و افت دست بالا و در مورد عکس‌العمل تکیه‌گاه دست پایین است. یکی از مواردی که در این تحقیق به آن توجه گردیده است، اثر فرکانس اول ارتعاش پل بر ضریب ضربه است [۱۲].

و شتاب قائم پل چندان تاثیرگذار نیست. بنابراین برای راحتی و آرامش مسافران صافی ریل‌ها اهمیت دارد [۹]. Gioeda در سال ۲۰۰۵، با بررسی پدیده تشدید در پل‌ها در اثر حرکت بارهای متوالی ناشی از عبور قطار بر عدم کفایت روش‌های موجود طراحی در آئین نامه‌های اروپایی تاکید نمود. بر اساس تحقیقات وی پاسخ‌های دینامیکی پل‌هایی که بر اساس مشخصات پیشنهادی انستیتوی تحقیقات ریلی اروپا (ERRI) طرح شده است، در برخی سرعت‌ها و فواصل محورهای خاص بسیار بیشتر از مقادیر مورد انتظار می‌باشد [۶].

## ۲- روابط ضریب ضربه در آئین‌نامه‌های مختلف

در روش متداول برای طراحی پل‌ها برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی ناشی از بار وسیله نقلیه، بار ترافیکی به عنوان یک بار استاتیکی لحاظ گردیده و با اعمال ضریب ضربه افزایش داده می‌شود. ضریب ضربه I بر اساس مقادیر ماکزیمم پاسخ‌های دینامیکی  $D_{dyn}$  و استاتیکی  $D_{st}$  طبق رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۰].

$$I = \frac{D_{dyn} - D_{st}}{D_{st}} \Rightarrow \frac{D_{dyn}}{D_{st}} = 1 + I \quad (1)$$

در اغلب آئین نامه‌های موجود برای طراحی پل‌ها، طول دهانه L (برحسب متر) به عنوان تنها شاخص تاثیر گذار بر پاسخ دینامیکی پل شناخته شده است. برای مثال آئین نامه آستو برای ضریب ضربه رابطه (۲) را پیشنهاد داده است [۱۰]:

$$I = \frac{15.24}{L + 38.1} \leq 30\% \quad (2)$$

آئین‌نامه پل‌های راه آهن آمریکا (AREMA) روابط (۳) را برای ضریب ضربه در پل‌های فولادی راه آهن ارائه داده است [۳]:

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

در آئین نامه ایران نیز رابطه (۴) برای ضریب ضربه I بر

Fryba در سال ۲۰۰۰ به موضوع تشدید ناشی از حرکت قطار بر روی پل‌ها پرداخت. او دو پارامتر را به عنوان عوامل اصلی تشدید در ارتعاش پل معرفی نمود. یکی اعمال بارهای متوالی ناشی از محورهای قطار و دیگری سرعت بالای قطارهای مدرن. در این تحقیق نشان داده شده است که بیشترین مقدار ارتعاشات پل مربوط به زمانی است که آخرین محور قطار از پل خارج می‌گردد و بر این اساس روابط ساده‌ای برای ضریب ضربه در پل‌های راه آهن پیشنهاد شده است. او همچنین نشان داد که بزرگی دامنه ارتعاش در حالت تشدید با طول دهانه پل و مجذور سرعت رابطه مستقیم و با میرایی، طول قطار و سختی پل رابطه معکوس دارد [۵].

Cheng و همکاران در سال ۲۰۰۱، ارتعاش پل‌های راه آهن را با در نظر گرفتن شرایط ریل‌ها مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که شرایط ریل‌ها تاثیر زیادی بر ارتعاش پل‌ها ندارد. همچنین در این تحقیق ضرایب بزرگنمایی دینامیکی برای شرایط مختلف ریل و بستر راه بررسی گردیده است [۴].

Lin در سال ۲۰۰۲، به مساله تشدید در پاسخ دینامیکی پلهای راه آهن به حرکت قطار پرداخت و نشان داد که فرکانس‌های ارتعاشی پل باید حتی المقدور متفاوت از فرکانس قطارها باشد [۷].

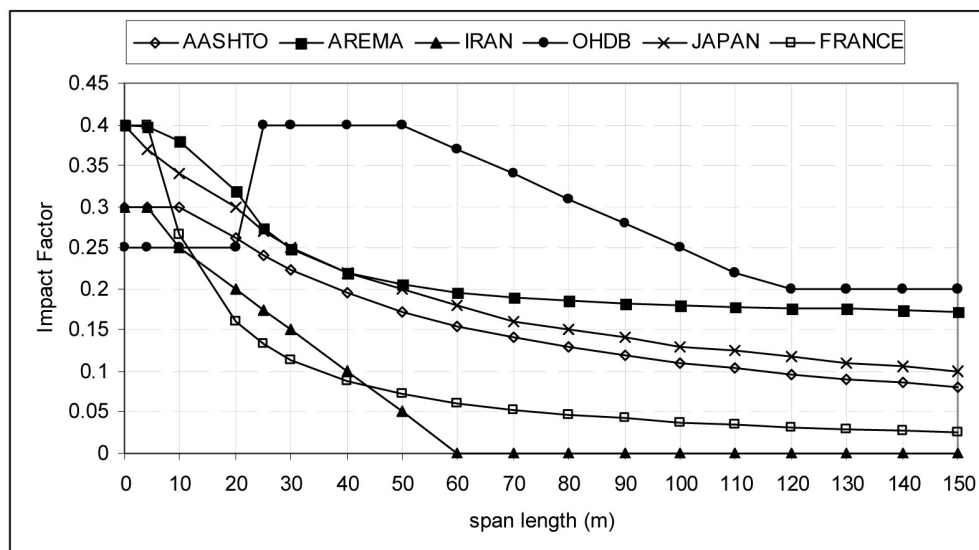
Lou در سال ۲۰۰۴، اندرکنش پل راه آهن و قطار را با مدل المان محدود مورد ارزیابی قرار داد و اثر صافی ریل‌ها را بر کاهش پاسخ‌های دینامیکی پل بررسی نمود. در این تحقیق قطار، ریل و پل به صورت یک سیستم به هم پیوسته مدل شده است تا اندرکنش پل و قطار مورد بررسی قرار گیرد. معادلات حرکت مستقیماً از اصل هامیلتون استخراج شده است. پس از تهیه ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی برای کل سیستم معادلات حاصل به صورت گام به گام حل گردیده است. برخی مثال‌های عددی نیز در این تحقیق به عنوان نمونه بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که شرایط ریل بر جابجایی و شتاب قائم قطار اثر جدی دارد ولی بر چرخش بدنه قطار و جابجایی

بین ۲/۵ تا ۴/۵ هرتز و بزرگتر از ۶ هرتز به ترتیب ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۲۵ پیشنهاد نموده است. برای نقاط بین ۱ تا ۲/۵ هرتز و ۴/۵ تا ۶ هرتز نیز مقدار ضریب ضربه به صورت خطی تغییر می‌نماید. روابط ضریب ضربه در شکل (۱) بر اساس طول دهانه پل و با استفاده از آئین‌نامه‌های فرانسه (FRANCE)، ژاپن (JAPAN)، اونتاریو (OHBD)، ایران (IRAN)، پل‌های راه آهن آمریکا (AREMA) و پل‌های بزرگراه‌های آمریکا (AASHTO) ترسیم شده‌اند [۱۰].

اساس طول دهانه پل  $L$  (بر حسب متر) و ارتفاع خاکریز روی پل  $h$  (بر حسب متر) ارائه شده است [۱۰]:

$$I = 0.3 - 0.005L - 0.15h \quad (4)$$

در برخی از آئین‌نامه‌های طراحی پل مانند آئین‌نامه OHBD اونتاریو (کانادا) و آئین‌نامه استرالیا ضریب ضربه بر اساس فرکانس مود اول ارتعاشی پل تعیین شده است. برای مثال در آئین‌نامه OHBD اونتاریو مقدار ضریب ضربه را برای پل‌های با فرکانس ارتعاشی کمتر از ۱ هرتز،



شکل (۱): ضریب ضربه بر اساس آئین‌نامه‌های مختلف [۱۰]

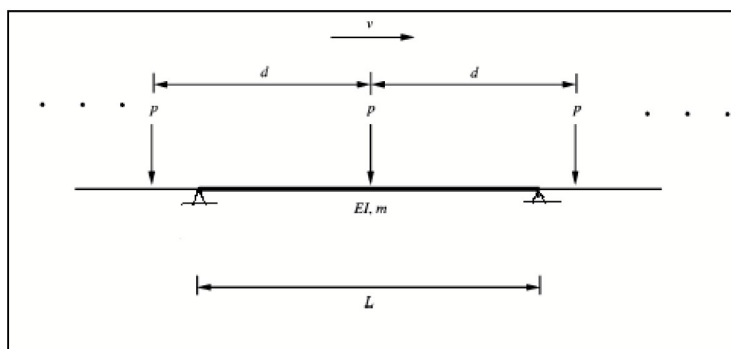
متمركز می‌باشد. این روش علاوه بر دقت، نسبتاً ساده بوده و انجام تحلیل‌های فراوان در زمان کم را، که در این تحقیق برای بررسی اثر پارامترهای مختلف مورد نیاز می‌باشد، فراهم می‌آورد.

برای بررسی تئوری حاکم بر حرکت قطار بر پل با دهانه ساده، مطابق شکل (۲) یک تیر با دهانه‌ای به طول  $L$  و مقطع ثابت در نظر گرفته شده است. قطار مورد نظر نیز به صورت مجموعه‌ای از بارهای متمركز هم فاصله در نظر گرفته می‌شود که با سرعت ثابت  $v$  روی تیر حرکت می‌کنند. فاصله این بارها  $d$  و مقدار هر بار  $p$  لحاظ شده است.

از مقایسه مقادیر ضریب ضربه که بر اساس آئین‌نامه‌های مختلف محاسبه شده‌اند، مشخص می‌گردد که در محدوده دهانه‌های ۲۵ تا ۵۰ متر آئین‌نامه OHDB مقادیر بیشتری را برای ضریب ضربه، نسبت به سایر آئین‌نامه‌ها پیشنهاد می‌نماید در حالیکه برای دهانه‌های کوچکتر آئین‌نامه‌های AREMA و ژاپن محافظه‌کارانه‌تر می‌باشند.

### ۳- اصول و مبانی رفتار دینامیکی پل‌ها تحت بارهای متمركز متحرک

ساده‌ترین روش برای بررسی پاسخ‌های دینامیکی پل‌ها تحت حرکت وسیله نقلیه در نظر گرفتن پل به صورت یک تیر ساده و تحلیل دینامیکی آن تحت حرکت بارهای



شکل (۲): نمایی از مدل قطار در حال حرکت بر روی پل به صورت بارهای متمرکز متحرک [۱۱]

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (9)$$

در رابطه (۹)  $q_n$  مختصات تعمیم یافته مود  $n$  ام و  $\sin(n\pi x/L)$  تابع شکل آن می‌باشد. با جایگذاری این رابطه به جای  $u$  در معادله دیفرانسیل ارتعاش پل و ضرب طرفین رابطه در  $\sin(n\pi x/L)$  و انتگرال گیری روی طول پل رابطه (۱۰) حاصل می‌شود.

$$\ddot{q}_n + 2\xi\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = F_n(t) \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) مقادیر  $\omega_n$  و  $F_n(t)$  به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌گردند.

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (11)$$

$$F_n(t) = \frac{2P}{mL} \sum_{j=1}^N \left( \sin\left(\frac{n\pi v(t-t_j)}{L}\right) \cdot H(t-t_j) + (-1)^{n+1} \sin\left(\frac{n\pi v(t-t_j - \frac{L}{v})}{L}\right) \cdot H\left(t-t_j - \frac{L}{v}\right) \right) \quad (12)$$

رابطه (۱۳) حل معادله دیفرانسیل (۱۰) با استفاده از روش دیوهمامل می‌باشد.

$$q_n(t) = \frac{1}{m\omega_{dn}} \int_0^t F_n(\tau) \cdot e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin(\omega_{dn}(t-\tau)) d\tau \quad (13)$$

$$q_n(t) = \frac{2PL^3}{n^4 EI \pi^4} \sum_{j=1}^N \frac{1}{(1-S_n^2)^2 + 4(\xi S_n)^2} \quad (14)$$

$$[AH(t-t_j) + (-1)^{n+1} BH(t-t_j - \frac{L}{v})]$$

معادله (۵) معادله حرکت دینامیکی این تیر تحت تاثیر بارهای متمرکز متحرک می‌باشد [۱۱]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u}''' + EIu''' = P \sum_{j=1}^N \delta(x - v(t-t_j)) \cdot [H(t-t_j) - H(t-t_j - \frac{L}{v})] \quad (5)$$

در این رابطه  $u'$  مشتق  $u$  نسبت به مختصات  $x$  را نشان می‌دهد و  $\dot{u}$  مشتق  $u$  نسبت به زمان را نشان می‌دهد. سایر علائم به قرار زیر می‌باشد:

$m$ : جرم واحد طول تیر،  $u(x,t)$ : جابجایی قائم تیر،  $C$ : میرایی،  $E$  و  $I$ : به ترتیب مدول الاستیسیته و ممان اینرسی مقطع،  $\delta$ : تابع دلتای دیراک،  $H(t)$ : تابع گام واحد،  $t_k = (k-1)d/v$ : زمان رسیدن بار  $k$  ام روی تیر و  $N$ : تعداد بارهای متحرک می‌باشد.

روابط (۶) و (۷) شرایط مرزی معادله ۵ را نشان می‌دهند.

$$u(0, t) = u(L, t) = 0 \quad (6)$$

$$EIu''(0, t) = EIu''(L, t) = 0 \quad (7)$$

با فرض اینکه پل در ابتدا در حال سکون است شرایط اولیه نیز با رابطه (۸) مشخص شده است.

$$u(x, 0) = \dot{u}(x, 0) = 0 \quad (8)$$

افت قائم پل با معادله (۹) قابل بیان است:

که در آن  $S_n$ ،  $A$  و  $B$  از روابط (۱۵) تا (۱۷) محاسبه می‌گردد:

$$S_n = \frac{n\pi v}{\omega_n L} \quad (15)$$

$$A = (1 - S_n^2) \sin\left(\frac{n\pi v}{L}(t - t_j)\right) - 2\xi S_n^* \cos\left(\frac{n\pi v}{L}(t - t_j)\right) + e^{-\xi\omega_n(t-t_j)} \cdot (2\xi S_n \cos \omega_{dn}(t - t_j) + \frac{S_n}{\sqrt{1-\xi^2}} (2\xi^2 + S_n^2 - 1) \sin \omega_{dn}(t - t_j)) \quad (16)$$

با محاسبه  $q_n(t)$  از رابطه (۱۴) و جایگذاری آن در رابطه (۹) جابجایی هر نقطه از تیر در فاصله  $x=0$  تا  $x=L$  و در زمان  $t$  قابل محاسبه می‌باشد.

$$B = (1 - S_n^2) \sin\left(\frac{n\pi v}{L}\left(t - t_j - \frac{L}{v}\right)\right) - 2\xi S_n^* \cos\left(\frac{n\pi v}{L}\left(t - t_j - \frac{L}{v}\right)\right) + e^{-\xi\omega_n\left(t - t_j - \frac{L}{v}\right)} \cdot \left(2\xi S_n \cos \omega_{dn}\left(t - t_j - \frac{L}{v}\right) + \frac{S_n}{\sqrt{1-\xi^2}} (2\xi^2 + S_n^2 - 1) \sin \omega_{dn}\left(t - t_j - \frac{L}{v}\right)\right) \quad (17)$$

#### ۴- مدل‌های دینامیکی

در تحلیل دینامیکی پل‌ها تحت تاثیر بارهای ترافیکی با توجه به اینکه پاسخ‌های پل مانند افت و شتاب در جهت قائم مورد توجه است، معمولاً در اغلب تحقیقات مساله به صورت دو بعدی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. یکی راستای طولی پل که در واقع راستای حرکت بار نیز می‌باشد و دیگری راستای قائم یا راستای اعمال بار در نظر گرفته می‌شوند.

#### ۴-۱- مدل سازی قطار

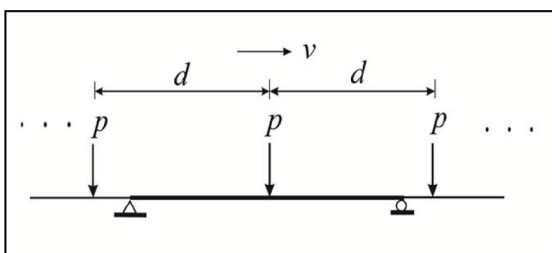
برای مدل سازی وسیله نقلیه معمولاً از مدل‌های ساده‌ای چون بارهای متمرکز تا مدل‌های پیچیده‌ای که شامل مجموعه‌ای از جرم‌ها، فنرها و میراگرها می‌شود در

تحقیقات استفاده شده است. در شکل (۳) برخی از مدل‌های متداول برای قطار نشان داده شده است. در مدل (الف) بار هر واگن در محل محورها به صورت یک بار متمرکز در نظر گرفته می‌شود و از اینرسی ناشی از جرم صرف نظر می‌گردد. در صورتی که جرم وسیله نقلیه در قیاس با جرم پل ناچیز باشد این روش در محاسبه پاسخ‌های دینامیکی پل دارای دقت کافی می‌باشد. در مواردی که جرم وسیله نقلیه قابل توجه باشد، می‌توان از روش جرم‌های متحرک برای مدل سازی وسیله نقلیه استفاده نمود که در مدل (د) از شکل (۳) نشان داده شده است. افزایش سرعت و قدرت محاسباتی کامپیوترها نیز امروزه این امکان را فراهم آورده است که از مدل‌های پیچیده تر بتوان در تحلیل‌ها استفاده نمود. در مدل (ج) در شکل (۳) وسیله نقلیه در هر محور به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود. در این روش مدلسازی قطار از نوسانات دورانی بدنه وسیله نقلیه صرف نظر شده است. در مدل (ب) از شکل (۳) هر واگن قطار به صورت یک پارچه مدل می‌گردد [۱۱].

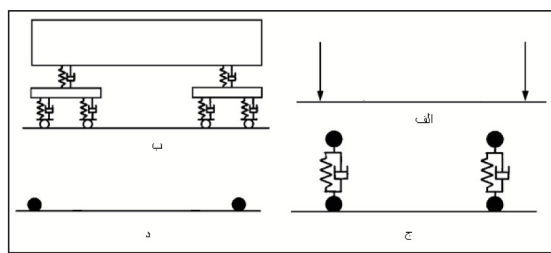
در بسیاری از تحقیقات نشان داده شده است که افزایش جزئیات مدل سازی وسیله نقلیه صرفاً در افزایش دقت محاسبه پاسخ‌های وسیله نقلیه موثر است و در پاسخ‌های پل تاثیر چشمگیری ندارد [۱۲، ۸]. بنابراین وقتی هدف از تحقیق مانند تحقیق حاضر، صرفاً بررسی پاسخ‌های پل و جنبه‌های سازه‌ای مساله باشد، در نظر گرفتن جزئیات کمتری برای مدل سازی وسیله نقلیه کفایت می‌کند.

در این تحقیق از مدل بارهای متمرکز مدل (الف) در شکل (۳) در تحلیل پاسخ‌های دینامیکی پل استفاده شده است. مشخصات قطار با توجه به قطارهای سریع‌السیر موجود که نمونه‌های از آن در مرجع [۶] ارائه شده است، تعیین گشته است. بار هر محور قطار ۲۰ تن و هر قطار شامل ۱۰ محور با فواصل یکسان در نظر گرفته شده است.

برای بررسی اثر فاصله محورها بر پاسخ‌های دینامیکی پل دوازده فاصله محور مختلف از ۱۳ تا ۲۴ متر در تحلیل‌های دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۴): مدل سازی پل به صورت تیر دو سر ساده



شکل (۳): روش های مختلف مدل سازی وسیله نقلیه در

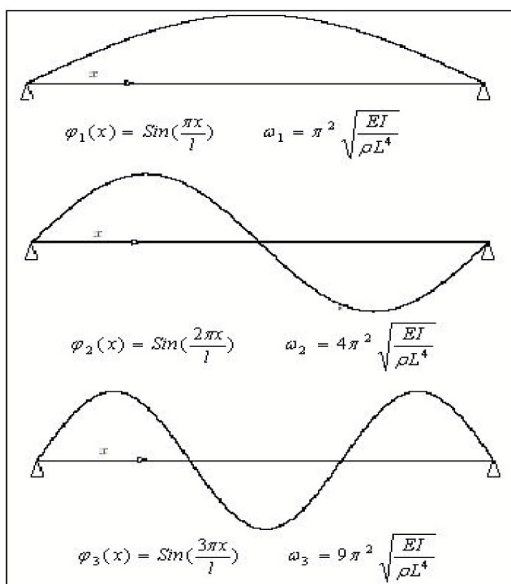
### کارهای تحقیقی

در صورتی که پل به صورت تیر ساده فرض شود شکل مودهای ارتعاش و فرکانس ارتعاش تیر ساده به ترتیب با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه می گردند [۹]:

$$(18) \quad \varphi_n(x) = \text{Sin}\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \quad \text{شکل مود ارتعاش:}$$

$$(19) \quad (n\pi)^2 \sqrt{\frac{EI}{mI^4}} \quad \text{فرکانس مود ارتعاش:}$$

در شکل (۵) سه مود اول ارتعاش تیر دو سر ساده نشان داده شده است.



شکل (۵): سه مود اول ارتعاش تیر دو سر ساده [۹]

در این تحقیق چهار پل فولادی با دهانه های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصه های دینامیکی این پل ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

سرعت حرکت قطار برای هریک از فاصله محورها از ۱۰۹ تا ۴۰۶ کیلومتر بر ساعت تغییر داده شده است. سرعت ها با گام ۲/۵ متر بر ثانیه (۹ کیلومتر بر ساعت) افزایش یافته اند. به این ترتیب برای هر یک از فاصله محورها سی و چهار سرعت حرکت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در جدول (۱) مشخصات قطار در تحلیل های دینامیکی این تحقیق، نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصه های قطار در تحلیل های دینامیکی

مشخصه های قطار	محدوده تغییرات	تعداد	تعداد تحلیل های دینامیکی
بار هر محور (ton)	۲۰	۱	۱۲۲۴
تعداد محورها	۱۰، ۸، ۶	۳	
فاصله محورها (m)	۱۵، ۱۴، ۱۳، ...، ۲۴	۱۲	
سرعت حرکت (km/h)	۱۱۸، ۱۰۹، ...، ۴۰۶، ۱۹۷	۳۴	

### ۲-۴- مدل سازی پل

با توجه به اینکه اغلب پلهای فولادی راه آهن به صورت تک دهانه و با تکیه گاه های ساده می باشند، متداول ترین روش برای مدل سازی پل های راه آهن در نظر گرفتن پل به صورت تیر دو سر ساده می باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به اینکه در تحلیل دینامیکی پل ها تحت حرکت وسیله نقلیه، عمده ارتعاشات و جابجایی ها در راستای قائم بر پل اتفاق می افتد بنابراین در نظر گرفتن مساله به صورت دو بعدی برای بررسی پاسخ های دینامیکی پل کفایت می نماید.

برای هر یک از پل‌های مورد بررسی، تحلیل‌های دینامیکی برای هریک از سرعت‌ها، فاصله محورها و تعداد محورهای قطار مندرج در جدول (۱)، انجام گرفته است. به این ترتیب ۴۸۹۶ تحلیل دینامیکی انجام شده است.

جدول (۲): مشخصات پل‌های مورد بررسی در تحقیق

$\omega_1 = 2\pi f$ (rad/s)	فرکانس ارتعاشی مود اول (Hz)	طول دهانه پل (m)
۷۵,۳۶	۱۲	۱۰
۵۰,۲۴	۸	۱۵
۳۷,۶۸	۶	۲۰
۳۰,۱۴۴	۴,۸	۲۵

### ۳-۴- تدوین برنامه برای تحلیل دینامیکی در فضای

#### نرم افزار Matlab

در این تحقیق از روش تحلیلی با در نظر گرفتن پل به صورت تیری ساده و در نظر گرفتن محورهای قطار به صورت بارهای متمرکز برای بررسی پاسخ‌های پل‌ها به حرکت قطار استفاده شده است.

با این فرضیات برای مدل سازی پل و قطار و بر اساس روابط (۹) تا (۱۳)، برنامه‌ای در محیط Matlab تدوین شده است که امکان محاسبه افت در نقاط مختلف پل در طول زمان عبور محورهای قطار و همچنین مقدار ماکزیمم افت حاصل از این برنامه، ابتدا برای یک پل که در مرجع [۶] نتایج تحلیل دینامیکی آن تحت حرکت بارهای متحرک موجود است، برنامه اجرا گردیده است.

این پل با دهانه ساده و به طول ۱۵ متر، جرم واحد طول  $\bar{m} = 15 \text{ t/m}$ ، سختی خمشی  $EI = 7694081 \text{ KN-m}^2$ ، فرکانس مود اول ارتعاش  $f_0 = 5 \text{ Hz}$ ، درصد میرایی  $\xi = 0.02$  و فاصله محورهای قطار  $d = 16 \text{ متر}$  می‌باشد.

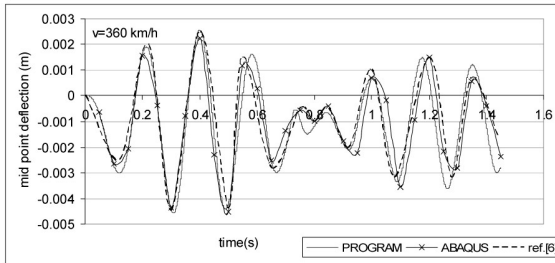
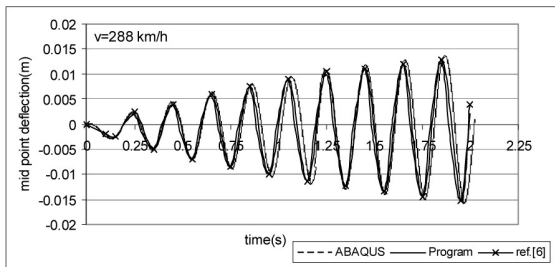
همچنین برای این پل تحلیل دینامیکی در محیط نرم‌افزاری ABAQUS انجام گرفته است. در شکل (۶) پاسخ‌های این پل به بار متحرک برای سرعت‌های ۲۸۸ و ۳۶۰ کیلومتر بر

ساعت نشان داده شده است. نتایج حاصل از برنامه برای افت وسط دهانه پل با دقت خوبی با نتایج کارهای قبلی و خروجی‌های تحلیل دینامیکی در محیط ABAQUS انطباق دارد.

### ۵- تحلیل‌های دینامیکی

بر اساس تحقیقات انجام گرفته محاسبه ضریب ضربه بر مبنای افت مقادیر دست بالاتری نسبت به ضرایب ضربه محاسبه شده بر مبنای تنش به دست می‌دهد [۱۰]. بنابراین در این تحقیق ضرایب ضربه بر اساس ماکزیمم افت استاتیکی و دینامیکی در وسط دهانه پل محاسبه می‌گردد.

برای هریک از چهار پل مورد بررسی با مشخصات مندرج در جدول (۲)، در این تحقیق، برای ۳۴ سرعت مختلف و ۱۲ فاصله محور مختلف و سه تعداد مختلف محور مطابق مندرجات جدول (۱)، تحلیل‌های دینامیکی انجام گرفته است و تاریخچه تغییرات افت وسط دهانه با زمان در حین عبور بار و همچنین ماکزیمم افت وسط دهانه و در نتیجه ضریب ضربه محاسبه شده‌اند.



شکل (۶): مقایسه پاسخ دینامیکی پل به عبور محورهای قطار با سرعت ۲۸۸ و ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت حاصل از برنامه تدوین شده و نرم‌افزار ABAQUS

## ۵-۱- سرعت حرکت قطار

$$G_1(v, t) = \sum_{j=1}^N \left\{ \sin \Omega_1(t - t_j) - S_1 \sin \omega_1(t - t_j) \right\} H(t - t_j) + [\sin \Omega_1(t - t_j - L/v) - S_1 \sin \omega_1(t - t_j - L/v)] H(t - t_j - L/v) \quad (21)$$

در صورتی که بار  $n$  روی پل باشد مقدار  $G_1$  که از رابطه (۲۱) قابل محاسبه است، به صورت رابطه (۲۲) قابل بازنویسی است:

$$G_1(v, t) = [\sin \Omega_1(t - t_n) - S_1 \sin \omega_1(t - t_n)] H(t - t_n) - 2S_1 \cos\left(\frac{\omega_1 L}{2v}\right) * [\sin \Omega_1(t - L/2v) + \sin \omega_1(t - L/2v - t_n/2)] * \frac{\sin \omega_1\left(\frac{t_n}{2} - \frac{d}{2v}\right)}{\sin \frac{\omega_1 d}{2v}} * H(t - t_n - L/v) \quad (22)$$

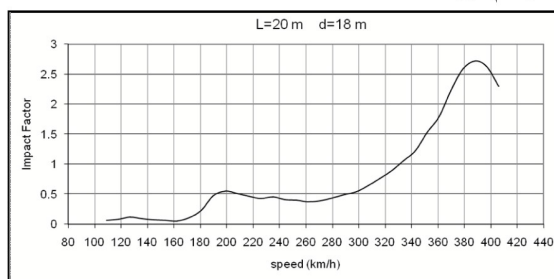
در رابطه (۲۲)، ترم دوم مربوط به اثر محورهای قبل از محور  $n$  ام است. در صورتی که  $\sin\left(\frac{\omega_1 d}{2v}\right) = 0$  که در مخرج کسر قرار دارد مساوی صفر شود و شرایط رابطه (۲۲) برقرار گردد، پاسخها افزایش چشمگیری خواهد داشت.

$$\sin\left(\frac{\omega_1 d}{2v}\right) = 0 \Rightarrow \frac{\omega_1 d}{2v} = k\pi \Rightarrow \frac{d}{v} = \frac{k}{f} \quad (23)$$

لذا در صورتی که رابطه (۲۳) بین سرعت حرکت و فاصله محورهای قطار و فرکانس ارتعاشی پل به ازاء مقادیر صحیح  $k$  برقرار شود پاسخهای دینامیکی پل افزایش چشمگیری خواهند داشت. نقاط ماکزیمم در شکل‌های (۷) و (۸) متناظر با چنین شرایطی است. بزرگترین ماکزیمم‌ها به ازاء  $k=1$  حاصل می‌شود. همانطور که در شکل‌های (۷) تا (۸) دیده می‌شود این شرایط معمولاً در سرعت‌های بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت رخ می‌دهد. علت این امر نیز برقراری رابطه  $\frac{d}{v} = \frac{k}{f}$  به صورت  $\frac{d}{v} = \frac{1}{f}$  می‌باشد. یعنی فرکانس ارتعاشی پل و بارگذاری دقیقاً بر هم منطبق می‌گردند. در سرعت‌های کمتر به علت اینکه فرکانس

نتایج تحلیل‌های دینامیکی پل‌ها برای سرعت‌های مختلف حرکت قطار نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالا که امروز در مسیرهای ریلی پر سرعت متداول می‌باشد، افزایش چشمگیری در پاسخ‌های دینامیکی پل دیده می‌شود. در شکل‌های (۷) و (۸) دو نمونه از نتایج تحلیل‌های انجام گرفته نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود که تغییرات سرعت بر مقادیر ضریب ضربه اثر می‌گذارد و لذا برخلاف پیشنهاد آئین‌نامه‌ها برای یک پل نمی‌توان صرفاً یک مقدار ضریب ضربه ارائه نمود. در این شکل‌ها به دلیل وقوع پدیده تشدید یعنی برابری فرکانس اعمال بار با فرکانس پل در سرعت‌های مشخصی منحنی تغییرات ضریب ضربه با سرعت دارای نقاط ماکزیمم می‌باشد.



شکل (۷): تغییرات ضریب ضربه با تغییر سرعت حرکت بار برای پل با دهانه ۲۰ متر و فاصله محورهای ۱۸ متر



شکل (۸): تغییرات ضریب ضربه با تغییر سرعت حرکت بار برای پل با دهانه ۲۵ متر و فاصله محورهای ۲۲ متر

با بازنویسی رابطه (۹) و استفاده از روابط (۱۵) تا (۱۷) و با در نظر گرفتن مود اول رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$u(x, t) = \frac{2pL^3}{EI\pi^4} * \frac{1}{1 - S_1^2} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) * G_1(v, t) \quad (20)$$

که در آن  $G_1(v, t)$  از رابطه (۲۱) محاسبه می‌گردد.

بارگذاری کاهش می‌یابد و از محدوده‌های متداول فرکانس ارتعاشی پل کمتر می‌شود پیک‌های کوچکتری در پاسخ‌های دینامیکی پل به ازاء برقراری تساوی بین فرکانس بارگذاری با  $\frac{1}{2}$  فرکانس پل،  $\frac{1}{3}$  فرکانس پل و ... به وجود می‌آید. برای مثال در شکل (۷) که برای پل ۲۰ متری با فرکانس ارتعاشی ۶ هرتز و فاصله محورها ۱۸ متر ترسیم شده است یک ماکزیمم در سرعت تقریبی ۳۸۸ کیلومتر بر ساعت دیده می‌شود که ماکزیمم اصلی منحنی نیز می‌باشد. در عین حال یک نقطه ماکزیمم نیز در سرعت ۱۹۵ کیلومتر بر ساعت دیده می‌شود که مقدار آن از قبلی خیلی کوچکتر است. روابط (۲۴) و (۲۵) مقادیر  $k$  را برای هریک از نقاط ماکزیمم نشان می‌دهد.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{v} &= \frac{k}{f} \\ f &= 6 \\ d &= 18 \\ v &= 388 \quad km/h = 107.78 \quad m/s \end{aligned} \right\} \Rightarrow k = 1 \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} f &= 6 \\ d &= 18 \\ v &= 195 \quad km/h = 55.56 \quad m/s \end{aligned} \right\} \Rightarrow k = 1.99 \approx 2 \quad (25)$$

با توجه به اینکه مقدار ماکزیمم ضریب ضربه در محدوده سرعت‌های بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت بسیار بیشتر از مقادیر متداول ضریب ضربه است و احتمالاً طراحی بر اساس آن باعث افزایش هزینه‌ها و غیراقتصادی شدن طرح‌ها می‌گردد، باید در سرعت‌ها بالا از وقوع شرایط تشدید به شدت اجتناب گردد.

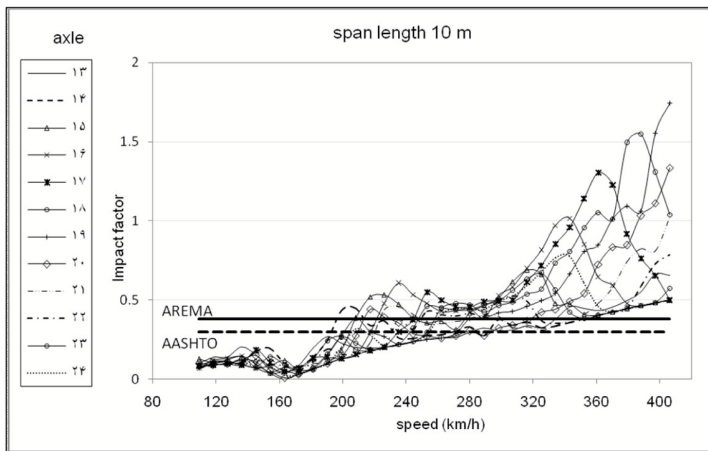
برای دست یابی به یک شمای کلی از نحوه تغییرات ضریب ضربه در پل‌های مختلف و اثرات سرعت حرکت قطار بر آن در شکل‌های (۹) تا (۱۲) مقادیر ضریب ضربه برای هریک از پل‌ها با دهانه‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر و برای ۳۴ سرعت مختلف از ۱۰۹ تا ۴۰۶ کیلومتر بر ساعت و تعداد ۱۲ فاصله محور از ۱۳ تا ۲۴ متر ترسیم شده است. در این شکل‌ها مقادیر ضریب ضربه بر اساس آئین نامه‌های AASHTO و AREMA نیز برای مقایسه ارائه شده است.

مقادیر ضریب ضربه در این شکل‌ها با در نظر گرفتن ده محور برای قطار به دست آمده است.

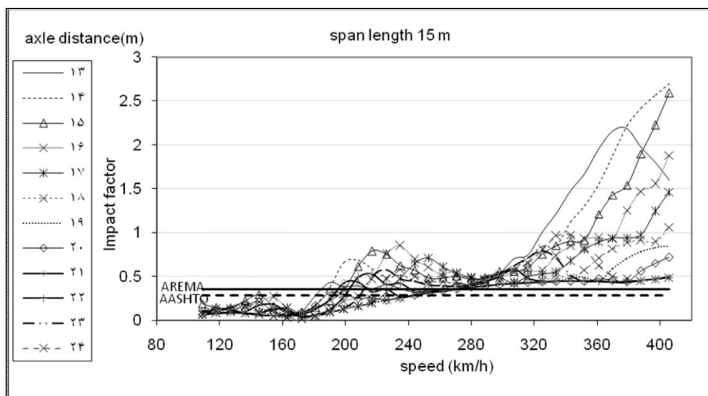
در شکل‌های (۹) تا (۱۲) دیده می‌شود که مقدار ضریب ضربه ارائه شده در آئین نامه‌های AASHTO و AREMA برای پل‌های مورد بررسی در بسیاری از شرایط بالاخص با افزایش سرعت بسیار کمتر از مقادیر به دست آمده از تحلیل‌های دینامیکی می‌باشد. همچنین دیده می‌شود که روند تغییرات ضرایب ضربه در محدوده سرعت‌های مختلف یکسان نمی‌باشد. در صورت ارائه یک رابطه واحد برای ضریب ضربه در تمام شرایط بدون در نظر گرفتن پارامترهای تاثیر گذاری چون فاصله محورها و سرعت حرکت قطار (آنگونه که در آئین نامه‌های طراحی پل متداول است) ممکن است طرح پل برای برخی از شرایط غیرایمن و در برخی از حالات دارای ظرفیت اضافی و غیراقتصادی باشد.

با بررسی شکل‌های (۹) تا (۱۲) مشاهده می‌شود که مقادیر و روند تغییرات ضریب ضربه در هریک از سه محدوده سرعت کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت، بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت متفاوت می‌باشد. بنابراین برای دست یابی به روابط مناسب برای ضریب ضربه، پاسخ‌های حاصل برای هر یک از این سه محدوده سرعت به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

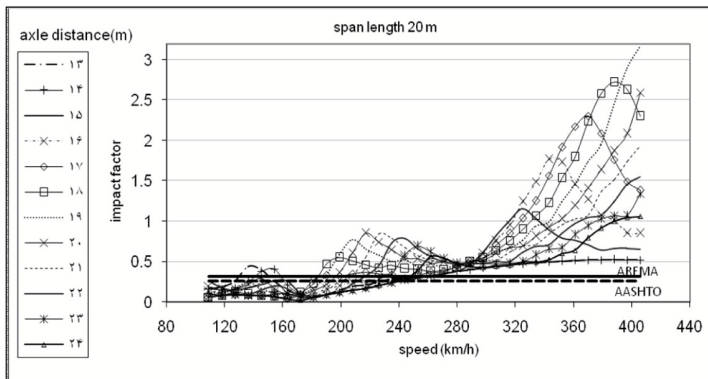
نکته دیگری که از بررسی نتایج ارائه شده در شکل‌های (۹) تا (۱۲) مشاهده می‌شود، اختلاف مقادیر ضریب ضربه در محدوده سرعت‌های ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در پل ۲۵ متری برای فاصله محورها ۱۳، ۱۴ و ۱۵ متر نسبت به سایر پل‌های مورد بررسی در این تحقیق است. در این محدوده برای فاصله محورها ۱۳، ۱۴ و ۱۵ متر افزایش در مقادیر ضریب ضربه برای پل ۲۵ متری دیده می‌شود. در واقع در این شرایط نسبت فاصله محورها به طول دهانه پل در حدود ۰/۵ می‌باشد، که نشان‌دهنده اهمیت نسبت بین فاصله محورها و طول دهانه پل است. در آئین نامه‌های موجود با افزایش طول دهانه پل ضریب ضربه افت می‌نماید. ولی نتایج نشان می‌دهد که در برخی از شرایط ضریب ضربه در پل با دهانه بزرگتر بیشتر از پل با دهانه کوچکتر است.



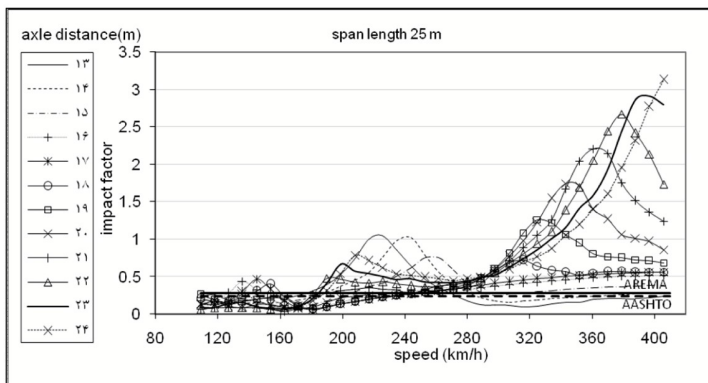
شکل (۹): ضریب ضربه برای پل با دهانه ۱۰ متر برای فواصل مختلف محوره‌های قطار



شکل (۱۰): ضریب ضربه برای پل با دهانه ۱۵ متر برای فواصل مختلف محوره‌های قطار



شکل (۱۱): ضریب ضربه برای پل با دهانه ۲۰ متر برای فواصل مختلف محوره‌های قطار



شکل (۱۲): ضریب ضربه برای پل با دهانه ۲۵ متر برای فواصل مختلف محوره‌های قطار

جدول (۳): ضریب ضربه برای و قطار با فاصله محورهای

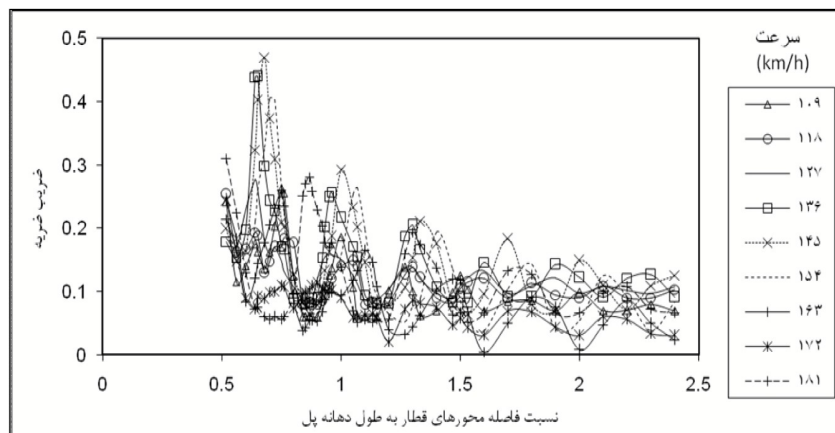
۱۴ متر و سرعت حرکت ۲۴۰ کیلومتر بر ساعت

طول دهانه پل	AASHTO	AREMA	تحقیق
۲۰	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳
۲۵	۰/۲۴	۰/۲۷	۱/۰

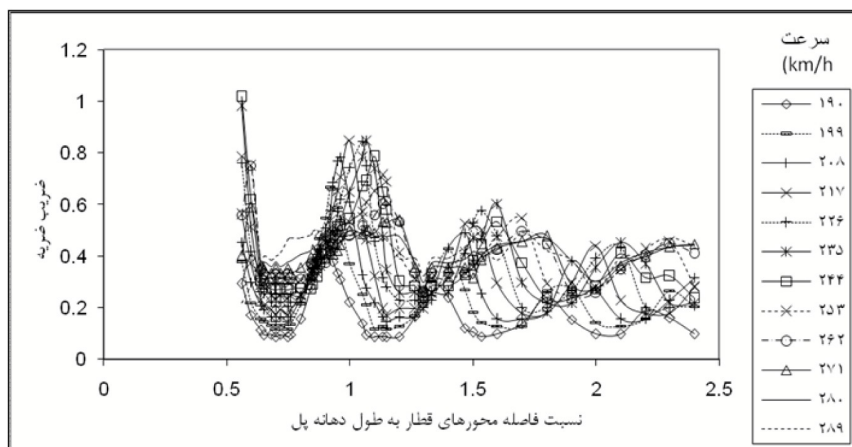
۵-۲- نسبت فاصله محورهای قطار به طول دهانه پل

تغییرات ضریب ضربه با نسبت «فاصله محورهای قطار به طول دهانه پل»، در دو محدوده سرعت کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت و بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، برای پل‌های مورد بررسی در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است.

برای مثال نتایج مندرج در جدول (۳) نشان می‌دهد که اگر قطار با فاصله محورهای ۱۴ متر با سرعتی در حدود ۲۴۰ کیلومتر بر ساعت از روی پل ۲۰ متری و ۲۵ متری عبور نماید، ضریب ضربه از تحلیلهای دینامیکی برای اولی ۰/۳ و برای دومی در حدود ۱ به دست می‌آید. که این امر نشان می‌دهد برخلاف نظر آئین‌نامه‌های موجود در این حالت پل با دهانه بزرگتر ضریب ضربه بیشتری خواهد داشت. بنابراین برای افزایش دقت روابط ضریب ضربه، باید پارامتر نسبت فاصله محورها به طول دهانه پل مد نظر قرار گیرد. در عین حال تفکیک محدوده‌های سرعت حرکت قطار نیز می‌تواند در افزایش ایمنی و اقتصادی‌تر شدن طرح‌ها موثر باشد.



شکل (۱۳): ضریب ضربه برای سرعت‌های کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت

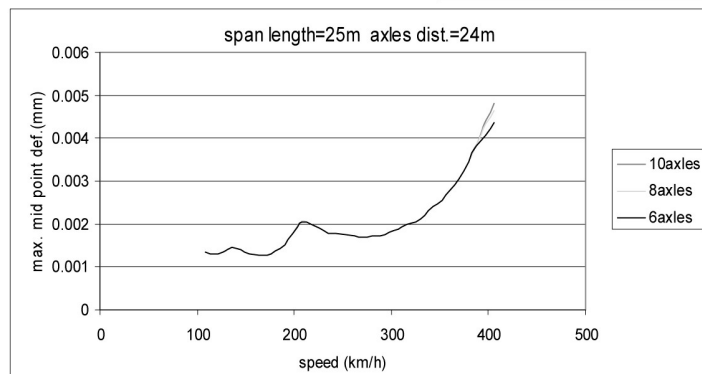
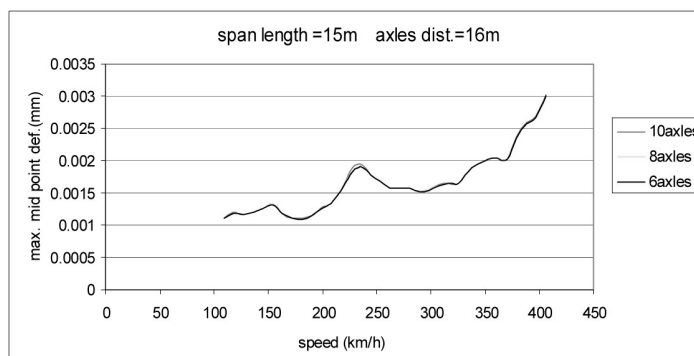


شکل (۱۴): ضریب ضربه برای سرعت‌های ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت

### ۵-۳- تعداد محورها

برای بررسی اثر تعداد واگن‌های عبوری از روی پل بر پاسخ‌های دینامیکی پل، تحلیل‌های دینامیکی برای قطارهایی با ۶، ۸ و ۱۰ محور عبوری انجام گرفت. نتایج نشان دهنده آنست که تعداد محورها بر پاسخ‌های ماکزیمم پل اثر چشمگیری ندارد و تفاوت در پاسخ‌ها صرفاً در نقاط پیک منحنی‌ها (شرایط تشدید) دیده می‌شود. بنابراین برای ارائه روابط ضریب ضربه تعداد محورهای قطار اهمیت چندانی ندارد. در شکل (۱۵) دو نمونه از نتایج تحلیل‌های انجام گرفته برای طول دهانه ۱۵ و ۲۵ متر و فاصله محور ۱۶ و ۲۴ متر ارائه شده است.

تعداد ۱۲ فاصله محور برای قطار و تعداد چهار دهانه پل مطابق جداول (۱) و (۲) در نظر گرفته شده‌اند و منحنی‌های تغییرات برای سرعت‌های مختلف ترسیم شده‌اند. با بررسی نتایج بدست آمده دیده می‌شود که با کوچکتر شدن نسبت «فاصله محورها به دهانه پل»، مقادیر ضریب ضربه افزایش می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود که برای افزایش دقت روابط ضریب ضربه پارامتر نسبت فاصله محورها به طول دهانه در روابط ضریب ضربه مدنظر قرار گیرد.



شکل (۱۵): ماکزیمم افت وسط دهانه در  
ازاء عبور تعداد مختلف محوره‌های قطار

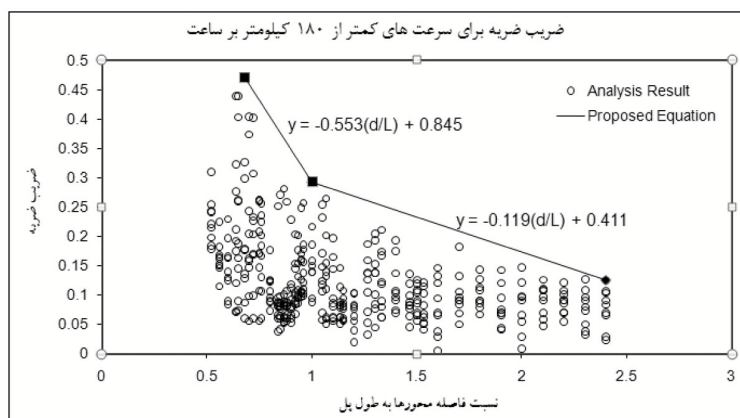
### ۶- ارائه روابط ضریب ضربه

بنابراین برای این دو محدوده سرعت روابط مختلفی برای تعیین ضریب ضربه در نظر گرفته خواهد شد. مقدار ضریب ضربه که از روابط پیشنهادی محاسبه می‌شود باید بیشتر از ضریب ضربه حاصل از تحلیل‌های دینامیکی برای شرایط متناظر گردد. لذا نقاط متناظر با حداکثر ضریب ضربه در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به هم وصل نموده و رابطه آنها به صورت ساده خطی بیان می‌شود.

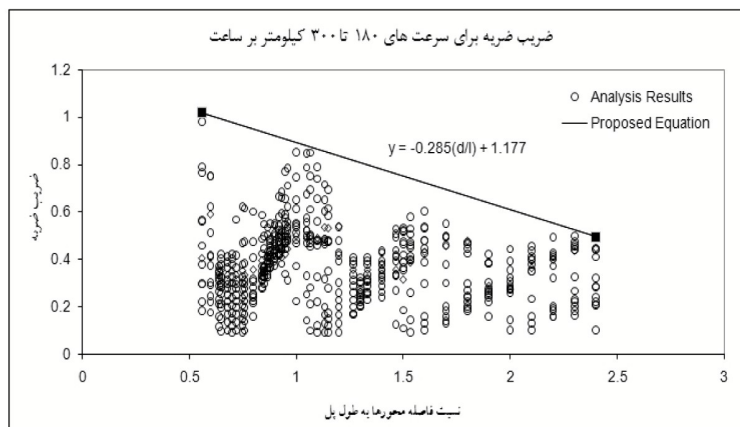
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ضریب ضربه محاسبه شده از تحلیل‌های دینامیکی برای کلیه حالت‌های مورد بررسی شامل تعداد ۱۲ فاصله محور برای قطار و چهار طول دهانه برای پل و ۲۱ سرعت مختلف حرکت قطار با تفکیک سرعت حرکت به دو محدوده کمتر از ۱۸۰ و بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت نشان داده شده است.

یکسان نمی‌باشد. بنابراین دو رابطه مجزا برای هر یک از این شرایط مطابق روابط (۲۶) و (۲۷) پیشنهاد می‌شود. در محدوده سرعت‌های ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت با توجه به یکنواختی توزیع نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی، رابطه خطی واحدی مطابق رابطه (۲۷) برای ضریب ضربه پیشنهاد می‌شود.

روابط ضریب ضربه بر اساس نوع پراکندگی نتایج حاصل از این تحقیق در شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، برای هر یک از محدوده‌های سرعت ارائه شده است. در محدوده سرعت‌های کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت پراکندگی مقادیر ضریب ضربه برای شرایطی که فاصله محورهای قطار کوچکتر از طول دهانه پل می‌باشد با شرایطی که فاصله محورهای قطار بزرگتر از طول دهانه پل است،



شکل (۱۶): روابط ضریب ضربه برای سرعت‌های کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت



شکل (۱۷): روابط ضریب ضربه برای سرعت‌های ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت

روابط ضریب ضربه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

به این ترتیب بسته به شرایط طرح می‌توان از یکی یا برخی از این روابط استفاده نمود.

برای  $180 \leq V \leq 300$ :

برای  $V \leq 180 \frac{km}{h}$  داریم:

$$I = -0.285\left(\frac{d}{L}\right) + 1.177 \quad (27)$$

$$I = \begin{cases} -0.553\left(\frac{d}{L}\right) + 0.845 & d \leq L \\ -0.119\left(\frac{d}{L}\right) + 0.411 & d \geq L \end{cases} \quad (26)$$

## ۷- جمع‌بندی و پیشنهادات

در این تحقیق یک مطالعه پارامتریک برای شناسایی اثرات پارامترهای مختلف مانند سرعت حرکت، فاصله محوره‌های قطار، تعداد محورها و طول دهانه پل بر پاسخ‌های دینامیکی پل‌های راه‌آهن و مقدار ضریب ضربه انجام گرفته است. پاسخ‌های دینامیکی و ضریب ضربه برای چهار پل با طول دهانه‌های مختلف و برای ۳۴ سرعت مختلف حرکت و ۱۲ فاصله مختلف محوره‌های قطار محاسبه گردیده است.

بررسی نتایج حاصل از این تحقیق و مقایسه آن با آئین نامه‌های طراحی پل نشان می‌دهد که در بسیاری از شرایط مقادیر پیشنهادی آئین‌نامه‌های موجود برای ضریب ضربه دست پائین بوده و نا ایمن می‌باشد. روابط ضریب ضربه در آئین نامه‌های طراحی پل صرفاً بر اساس طول دهانه پل تعریف شده است. روابط ارائه شده در آئین نامه‌های موجود دلالت بر افت ضریب ضربه با افزایش طول دهانه پل می‌کند ولی در نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در برخی از شرایط ضریب ضربه در پل‌ها با افزایش دهانه بیشتر می‌شود. در این تحقیق نشان داده شد که پارامترهای سرعت حرکت قطار و «نسبت فاصله محورها به طول دهانه پل» نیز در مقادیر ضریب ضربه مؤثر می‌باشند. در این تحقیق همچنین نشان داده شد که تعداد واگن‌های یک قطار اثر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ‌های ماکزیمم پل ندارد.

نتایج حاصله نشان می‌دهد که شرایط حاکم بر ضریب ضربه در سه محدوده سرعت (کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت، بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) و همچنین نسبت‌های مختلف فاصله محورها به طول دهانه پل، متفاوت می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت باعث افزایش مقادیر ضریب ضربه می‌گردد درحالی‌که افزایش نسبت فاصله محوره‌های قطار به طول دهانه پل اثر معکوس بر مقادیر ضریب ضربه دارد.

در این تحقیق بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی انجام شده، روابطی برای ضریب ضربه برای

سرعت‌های کمتر از ۱۸۰ کیلومتر بر ساعت و سرعت‌های بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت بر اساس نسبت فاصله محورها به طول دهانه در این تحقیق ارائه گردیده است. به این ترتیب علاوه بر لحاظ نمودن اثر سرعت در روابط ضریب ضربه، اثر همزمان فاصله محوره‌های قطار و طول دهانه پل نیز در روابط دیده شده است.

در سرعت‌های بالای ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت نتایج نشان می‌دهد که اختلاف پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی نسبتاً بالا می‌باشد و طراحی بر اساس آن باعث غیر اقتصادی شدن طرح‌ها می‌گردد. توصیه می‌شود که برای این محدوده از سرعت حرکت قطار و نحوه کاهش پاسخ‌های دینامیکی پل، تحقیقات بیشتری در آینده انجام گیرد.

## مراجع

- ۱- دانشجو و حاجیان، «رفتار دینامیکی پلهای کابلی ایستای تک محوری تحت تأثیر بار وسیله نقلیه متحرک» پایان‌نامه (کارشناسی ارشد)، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴
- ۲- طاحونی شاپور، طراحی پل، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۹
- 3-American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, "AREMA Manual", 2006
- 4-Cheng Y.S. & Cheng Y.K., "Vibration of railway bridges under a moving train by using bridge-track-vehicle element" Engineering Structures 23, 2001
- 5-Fryba L., "A rough assessment of railway bridges for high speed trains" Engineering Structures 23, 2001
- 6- Goicolea et al, "New dynamic analysis methods for railway bridges in codes IAPF and EuroCode 1", Railway Bridge Design, Construction and Maintenance Spanish group of IABSE Madrid, 12-14 June 2002
- 7- Ju & Lin, "Resonance characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges" Journal of Sound and Vibration, Oct. 2002
- 8- Karomi R., "Response of Cable-Stayed and Suspension Bridges to Moving Vehicles" 1999, Phd thesis, Royal Institute of Technology Sweden
- 9-Lou P., "A vehicle-track-bridge interaction element considering vehicle's pitching effect" Finite Elements in Analysis and Design 41, 2005
- 10- Ronagh H. & Moghimi H., "Impact factors for a composite steel bridge using non-linear dynamic simulation" International Journal of Impact Engineering, July 2007
- 11- Yang, Y. B., Yau, J. D., Wu, Y. S., "Vehicle-Bridge Interaction Dynamics- With application to High-Speed Railways", World Scientific, 2006
- 12- Zhang X. et al, "Evaluation of impact factors for composite concrete-steel cellular straight bridges", Engineering Structures 25, 2003