

## تحلیل دینامیکی پلهای راه آهن در خطوط مخصوص قطارهای سریع

محسنعلی شایانفر، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مختار انصاری، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
E-mail: shayanfar@iust.ac.ir

### چکیده

فناوری قطارهای سریع السیر در دنیا تا سرعت آزمایشی ۵۱۰ کیلومتر در ساعت پیش رفته است و آخرین دستاورد، مربوط به قطارهای TGV فرانسه است. پس از خرابی پیل بتنی مخصوص قطارهای سریع لیون-پاریس، آیین نامه های طراحی پیل رویکرد تازه ای به مبحث سرعت های زیاد داشته اند. آخرین تغییرات در آیین نامه های طراحی پیل با نظر به مسأله سرعت های زیاد، مربوط به آیین نامه IAPF, EURO CODE است که ضوابط خاصی را برای این سرعت ها در خطوط ریلی گنجانده است. بطور همزمان کشورهای ژاپن، کره، فرانسه، اسپانیا و سوئد نیز ضوابطی را برای کنترل در سرعت های زیاد در آیین نامه خود جای داده اند. اهمیت سرعت های زیاد به این علت است که تنش ها و خیزهای دینامیکی ایجاد شده به وسیله آن در مقایسه با حالت استاتیکی افزایش یافته و عملکرد این سازه ها را تحت بارهای سرویس دچار مشکل می کند. ناهمواری سطح روسازه راه آهن، ناهمواری سطح ریل و چرخها، نامنظمی مسیر و فاصله متساوی بین چرخ ها باعث می شوند که تشدید تنش های دینامیکی در سرعت های زیاد به ویژه در پلهای با دهانه کوتاه محسوس تر گردد. در این مقاله سعی شده است که سازه پیل با سرعت های مختلف تحلیل گردیده و محدوده رزونانس آن مشخص گردد. در نهایت عامل ضربه دینامیکی برای سه کمیت تغییر مکان، لنگر خمشی و برش در سرعت ها و دهانه های مختلف محاسبه شده و روند تغییرات آنها با افزایش سرعت و دهانه مشخص گردیده است.

واژه های کلیدی: تحلیل دینامیکی، تنش های دینامیکی، عامل ضربه دینامیکی، پیل راه آهن، رزونانس (تشدید)

### ۱. مقدمه

قطارهای سریع السیر (با سرعت بیش از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت) را می توان واکنش راه آهن به نیاز بازار حمل و نقل برای زمان کمتر سفر دانست. از سال ۱۹۶۰ به بعد افزایش سرعت در خطوط راه آهن به طور پیوسته آغاز شد. شروع استفاده از سرعت های زیاد توسط دو شبکه راه آهن بوده است [۷]  
۱- شبکه راه آهن ژاپن، با به خدمت گرفتن شینکانسن (راه آهن مخصوص قطارهای سریع بین توکیو و اوزاکا) با سرعت ۱۷۵ تا ۲۱۰ کیلومتر بر ساعت.

۲- راه آهن فرانسه، با افتتاح قطار سریع السیر TGV بین پاریس و لیون در سال ۱۹۸۱ با سرعت ۲۶۰ کیلومتر در ساعت که سرعت آن در سال ۱۹۸۳ به ۲۷۰ و در سال ۱۹۸۹ به ۳۰۰ کیلومتر در ساعت افزایش یافت.  
خطوط مخصوص قطارهای سریع در سال ۱۹۸۰ در آلمان غربی (خطوط هاننور- ورتزبرگ و مانهایم - اشتوتگارت)، ایتالیا (خط رم - فلورانس)، اسپانیا (خط مادرید - سویل)، فرانسه (خط TGV - آتلانتیک، پاریس - بر دو) و اخیراً خط پاریس - لندن از داخل کانال مانش ساخته شدند. بیشینه سرعت آزمایشی،

- ۱- دهانه یا طول تأثیر (برای تیرهای ساده این دو مفهوم معادلند)،
  - ۲- فرکانس طبیعی ارتعاش (که خود تابع جرم، سختی، طول دهانه و شرایط تکیه‌گاهی است)،
  - ۳- میرایی سازه،
  - ۴- جرم واحد طول پل،
- پارامترهای مسیر که در مشخصات دینامیکی تأثیر گذارند، عبارتند از:

- ۱- بی‌نظمی نیمرخ مسیر (شکل و اندازه)
  - ۲- وجود نقص در طول مسیر با فاصله منظم، نحوه تراکم بالاست (در صورت استفاده از بالاست) و اثر تیرهای عرضی کف
  - ۳- اندازه جرم‌های غیر معلق محورها (مجموعه دو چرخ و میله اتصال آنها)
- در گذشته پل‌های راه آهن براساس تحلیل استاتیکی طراحی می‌شدند، اما برای قطارهای با سرعت زیاد باید تحلیل دینامیکی انجام شود تا اثر پدیده رزونانس در طراحی سازه دیده شود. برای مثال پس از شروع کار قطارهای سریع‌السیر TGV در خط پاریس - لیون در پل‌های کوتاه اثرات زیر مشاهده شدند:

- ۱- خرد شدن و ترک خوردن بتن
  - ۲- فرسایش فوق‌العاده بالاست به علت شتاب زیاد
  - ۳- ایجاد نامنظمی در مسیر حرکت
- ناهمواری سطح روسازه، ناهمواری سطح ریل و چرخها، نامنظمی مسیر و فاصله مساوی بین چرخ‌ها باعث شده است که تشدید تنش‌های دینامیکی در سرعت‌های زیاد به ویژه در پلهای با دهانه کوتاه محسوس‌تر گردد [۱۰].
- در این مقاله سعی شده است سازه پل با سرعت‌های مختلف، تحلیل گردیده و محدوده رزونانس آن مشخص شود. در نهایت عامل ضربه دینامیکی برای سه کمیت تغییر مکان، لنگر خمشی و برش در مورد سرعت‌ها و دهانه‌های مختلف محاسبه و روند تغییرات این ضرایب با افزایش دهانه و سرعت بررسی می‌گردد.

## ۲. تحلیل دینامیکی پلهای راه آهن

### ۲-۱ ضریب ضربه

روش اساسی که از گذشته تاکنون در آیین‌نامه‌های موجود مهندسی برای تحلیل سرعت پل‌های راه‌آهن ارائه شده است، استفاده از ضریب ضربه است که عموماً با علامت  $\Phi$  مشخص می‌شود. این ضریب اثر دینامیکی بارهای متحرک را منظور کرده ولی پدیده رزونانس را در نظر نمی‌گیرد. آیین‌نامه‌ها تلاش

مربوط به قطارهای TGV در فرانسه است که رکوردی در حد ۵۱۵ کیلومتر بر ساعت را کسب کرده است.

در سالهای اخیر، در کشور ما احداث راه آهن مخصوص قطارهای سریع تهران - قم - اصفهان به طول تقریبی ۴۰۰ کیلومتر به صورت جدی مطرح شده است. از آنجا که ضوابط طراحی پلهای خطوط مخصوص قطارهای سریع تفاوت زیادی با خطوط معمولی دارند و این ضوابط هنوز به صورت استاندارد تدوین نشده اند، لذا باید از تجربیات طراحان این نوع راه آهن‌ها در دنیا استفاده کرد.

این مقاله، اثر دینامیکی سرعت در پلهای را بررسی می‌کند. دلایل بیشماری که سبب شده اند بررسی سرعت در پلهای راه آهن مورد توجه قرار گیرد به شرح زیرند:

- ۱- سرعت زیاد قطارهای سریع
- ۲- بار محوری قابل توجه قطارها
- ۳- فواصل منظم تکراری بین چرخ‌های قطارهای سریع
- ۴- سیستم تعلیق قطارهای سریع
- ۵- اضافه بارهای دینامیکی که در سرعت‌های زیاد متناسب با توان سوم سرعت افزایش می‌یابند

تمامی عوامل فوق به همراه خصوصیات مسیر (نامنظمی مسیر، ناهمواری مسیر و ...) باعث تشدید ارتعاشات دینامیکی پلهای راه آهن می‌شوند و درجه اهمیت آن را افزایش می‌دهند. بنابراین بررسی اثر سرعت در پلهای راه آهن بسیار مهم است، به نحوی که تمامی مقالات روز دنیا در زمینه دینامیک پلهای به این موضوع پرداخته اند. اهمیت سرعت‌های زیاد به آن علت است که تنش‌ها و خیزهای دینامیکی آن در مقایسه با حالت استاتیکی افزایش یافته و عملکرد این سازه‌ها را تحت بارهای سرویس دچار مشکل می‌نماید.

عامل افزایش دینامیکی برای پل‌های راه آهن از اندرکنش بین پل، وسیله نقلیه و مسیر ناشی می‌شود. به طور کلی پارامترهای کلیدی که بر روی دینامیک پل‌های راه آهن تأثیر می‌گذارند عبارتند از: مشخصات قطار، مشخصات سازه، مشخصات مسیر و سایر پارامترهای مرتبط.

پارامترهای مشخصه قطار مانند تغییر در مقدار بارهای محوری، فاصله بین محورها، فواصل منظم بین بارها، تعداد سازه‌های منظم روی پل و سرعت قطار بر دینامیک پلهای تأثیر می‌گذارند. باید این نکته را یاد آور شد که مشخصات تعلیق و سایل نقلیه، جرم‌های معلق و غیر معلق نقش کمتری در این امر ایفا می‌کنند.

پارامترهای سازه‌ای مهم که بر رفتار دینامیکی پلهای اثر دارند عبارتند از:

در فرمول‌های فوق  $v$  حداکثر سرعت بر حسب متر بر ثانیه،  $f_0$  فرکانس اول خمشی پل،  $L_\Phi$  طول مشخصه پل است.

با یک تحلیل ساده مشخص می‌شود که ضریب ضربه، اثرات دینامیکی ناشی از بار متحرک منفرد را پوشش می‌دهد. برای مثال بار متحرک متمرکز ۱۹۵ کیلو نیوتن با سرعت ثابت که از روی پلی با عرض ۱۵ متر عبور می‌کند، دارای جرم واحد طول

$$m = 15 \text{ Ton/m}, \quad \text{سختی خمشی} \quad EI = 7694081 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

فرکانس طبیعی  $f_0 = 5 \text{ HZ}$  و نرخ میرایی  $\zeta = 2\%$  است.

نتایج تحلیل دینامیکی این پل برای سرعت‌های مختلف در شکل (۱) آورده شده‌اند. اگر یک قطار ۱۰ محوره که فاصله بین محورهای آن ۱۶ متر است را با همین مشخصات پل تحلیل کنیم به نتایج دیگری می‌رسیم. نتایج تحلیل دینامیکی چنین پلی در دو سرعت ۲۸۸ کیلومتر بر ساعت و ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند. به راحتی مشخص می‌شود که پل در سرعت ۲۸۸ کیلومتر بر ساعت (سرعت کمتر) دچار رزونانس شده است. شکل (۳) اثرات دینامیکی بار منفرد و بار قطار را در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد [۵].

با ملاحظه این مثال‌های ساده مشخص می‌شود که در بسامد‌های معمول پلهای و فواصل منظم بین محورهای ترن، در سرعت‌های بیش از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت احتمال وقوع رزونانس در پلهای راه آهن زیاد است.

می‌کنند تا با پیشنهاد فرمول‌های ساده و با در نظر گرفتن سرعت قطار، فرکانس ارتعاشی سازه یا پل و ... این اثرات دینامیکی را پیش‌بینی کنند [۲].

اکثر آئین‌نامه‌ها برای منظور کردن اثر سرعت (اثر بار متحرک)، در شرایط خاصی از ضریب ضربه استفاده می‌کنند. آئین‌نامه EURO CODE برای مسیرهای با نگهداری استاندارد، ضریب ضربه

$$\Phi_{UIC} = 1 + \varphi' + \varphi'' \quad \text{و برای مسیرهای معمولی، ضریب}$$

$$\text{ضربه} \quad \Phi_{UIC} = 1 + \varphi' + 0.5\varphi'' \quad \text{را پیشنهاد کرده است. در}$$

این فرمول‌ها  $\varphi'$  فاکتور مربوط به اثر سرعت و  $\varphi''$  فاکتور مربوط به اثر ناهمواری است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4} \quad K < 0.76 \quad (1)$$

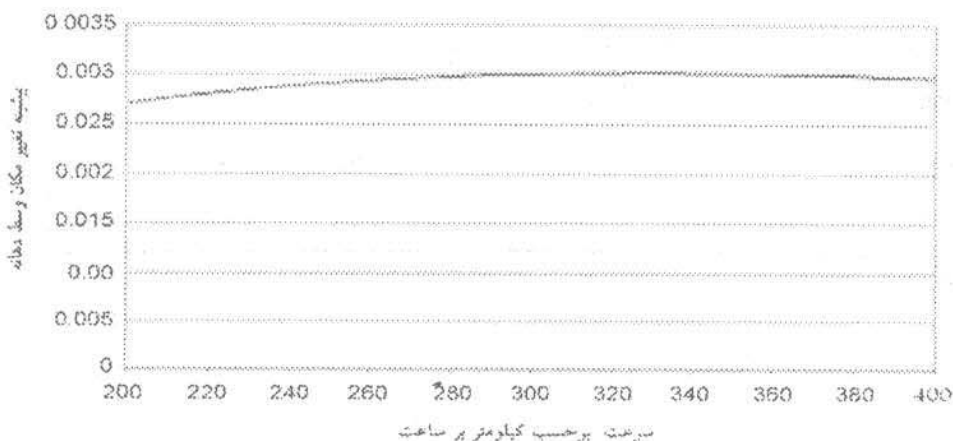
$$\varphi' = 1.325 \quad K \geq 0.76 \quad (2)$$

$$K = \frac{v}{2L_\Phi f_0} \quad (3)$$

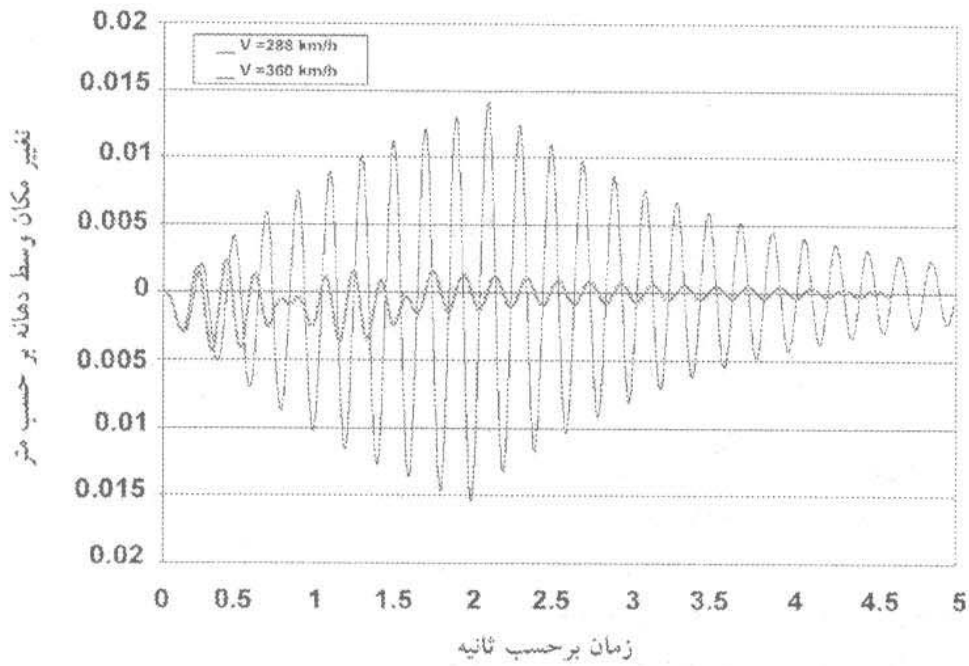
$$\varphi'' = \alpha \left[ 0.56 \exp\left(-\left(\frac{L_\Phi}{10}\right)^2\right) + 0.50 \left(\frac{f_0 L_\Phi}{80} - 1\right) \exp\left(-\left(\frac{L_\Phi}{20}\right)^2\right) \right] \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{v}{22} \quad v \leq 22 \frac{m}{s} \quad (5)$$

$$\alpha = 1 \quad v > 22 \frac{m}{s} \quad (6)$$



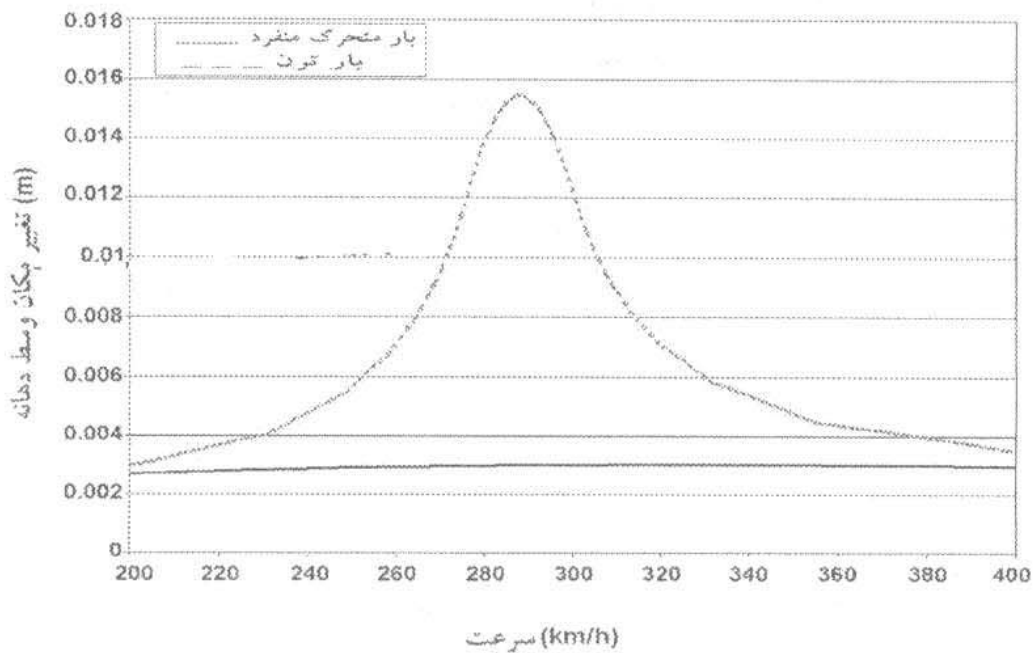
شکل ۱. بیشینه خیز وسط دهانه پل در سرعت‌های مختلف [۵]



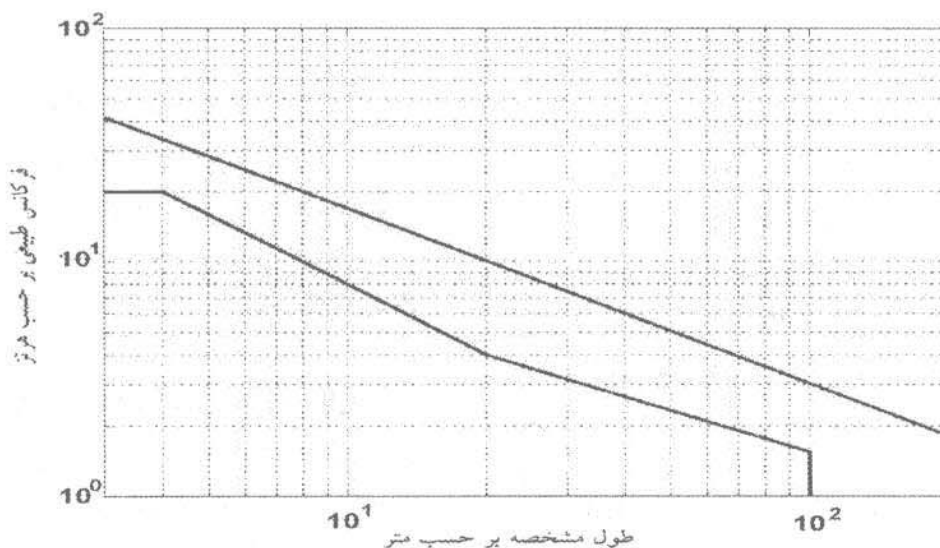
شکل ۲. بیشینه خیز وسط دهانه پل در سرعت ۲۸۸ و ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت [۵]

کیلومتر بر ساعت و بسامد طبیعی پل در محدوده مشخصی باشد. شکل (۴) محدوده مناسب در آیین نامه EURO CODE برای استفاده از ضریب ضربه را نشان می دهد [۴].

بنابر این برای سرعت های بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت در بنهای راه آهن، ضریب ضربه به تنهایی برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی پل کافی نیست. اکثر آیین نامه ها استفاده از ضریب ضربه را زمانی مجاز می دانند که سرعت، کمتر از ۲۰۰



شکل ۳. بیشینه تغییر مکان وسط دهانه برای بار متحرک منفرد و بار قطار [۴]



شکل ۴. حدود بسامد طبیعی برحسب طول دهانه با استفاده از ضریب ضربه [۳]

۲-۲ روشهای مختلف تحلیل دینامیکی

۱-۲-۲ روشهای تحلیلی

شکل مود  $i$  ام در آن هستند. معادله دیفرانسیل برای یک بار نقطه ای  $F$  که با سرعت ثابت  $V$  از تیر عبور می کند به صورت زیر است [۴].

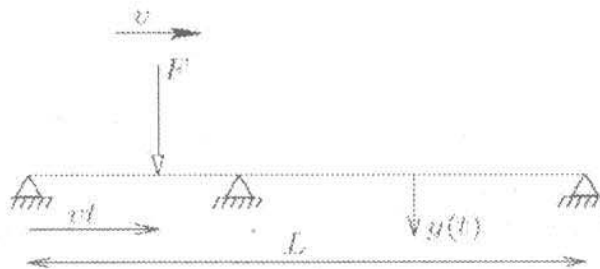
$$M_i \ddot{y}_i + 2\zeta_i \omega_i M_i \dot{y}_i + \omega_i^2 M_i y_i = F < \varphi_i(vt) > \quad (۷)$$

که در آن  $y_i$  مقدار جابه جایی مود  $i$  ام،  $\zeta_i$  نسبت میرایی در حالت بحرانی و  $< \varphi(x) >$  که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\begin{cases} \varphi(x) & 0 < x < l \\ 0 & x > l \end{cases} \quad (۸)$$

استفاده از این روش در سازه های ایزو استاتیک مناسب است، اما در سازه های پیچیده تر، تحلیل و استخراج مدهای ارتعاش و فرکانس ممکن نیست. بعد از تعیین مدهای ارتعاش، از معادلات ارتعاش انتگرال گیری می شود. ساده ترین حل، مربوط به پاسخ سازه برای یک بار منفرد است.

شکل (۵) یک تیر پیوسته با طول  $L$  را نشان می دهد که  $\phi_i(x), M_i, \omega_i$  به ترتیب بسامد ویژه مود  $i$  ام، جرم مود  $i$  ام و



شکل ۵. تیر تحت تأثیر بار متحرک منفرد [۴]

مشخصه دینامیکی را که زائیده بار قطار است مطرح می کند. این روش شامل مدل‌های LIR، DER و IDP است.

روش DER براساس تجزیه پاسخ دینامیکی پل با استفاده از سری فوریه استوار است و بر مطالعه جزء مربوط به بسامد تولید تشدید تأکید می نماید. این روش، در پی آن است که حد زیاد شتاب بیشینه در وسط دهانه تیر را به کمک دو تابع محاسبه کند، تابع اول به پاسخ پل و تابع دوم به مشخصه دینامیکی قطار مربوط می شوند.

روش توسعه یافته ریاضی LIR بر اساس تحلیل ارتعاشات آزاد که از عبور بار منفرد روی پل ساده حاصل می شود، شکل گرفته است و با آن تحلیل دینامیکی تیر زیر بارهای منفرد گذرنده انجام می شود.

روش IDP شتاب بیشینه پسماند ناشی از هر بار منفرد را بررسی می کند. این روش میرایی بار را از زمان ورود تا زمانی که پل را ترک می کند در نظر می گیرد که این خود یک حالت ارتعاش پسماند است.

در کلیه این روشها پاسخ دینامیکی به صورت شتاب یا تغییر مکان در یک نقطه محاسبه می شود. تابع پاسخ دینامیکی پل از ضرب سه جزء متفاوت به دست می آید. این سه ترم شامل مشخصات هندسی پل، مشخصات ارتعاشی پل و خصوصیات دینامیکی قطار هستند.

1 در قسمت بالا طول تیر است. بعد از محاسبه پاسخ یک بار متحرک، پاسخ سیستم به بار قطار از راه جمع آثار قوا برای بارهای نقطه‌ای  $f_k$  امکان پذیر می گردد.

### ۲-۲-۲ روشهای اجزای محدود

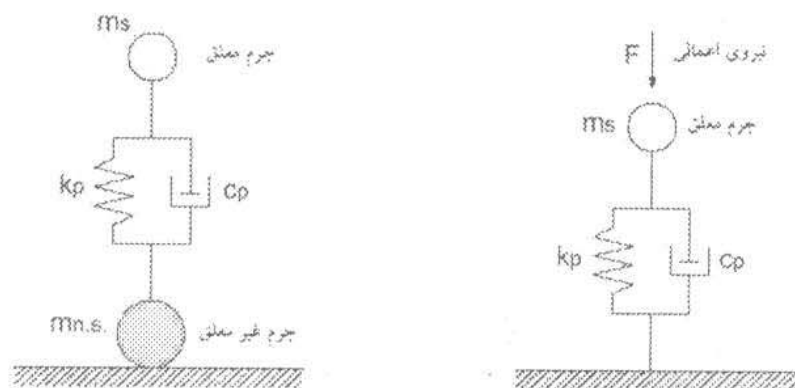
تحلیل دینامیکی پل‌های راه آهن تحت بارهای متحرک به کمک روش اجزای محدود نیز انجام شده است. عموماً این روشها برای سازه‌های با هندسه و شرایط تکیه گاهی پیچیده تر نیز قابل کاربرد هستند و حتی اثرات غیر خطی را نیز در محاسبات در نظر می گیرند.

### ۳-۲-۲ تحلیل دینامیکی با اندر کنش سازه و قطار

در این روش، سازه وسیله نقلیه و مسیر به صورت مجموعه ای از فنر، میراگر، جرم معلق و جرم غیر معلق مدل می شود. نمونه ای از اجزا اندر کنش در شکل (۶) دیده می شود [۶]. در روش مذکور تعداد معادلات دیفرانسیلی که باید حل شوند، افزایش می یابد. به ازای هر محور بار، یک معادله مربوط به سیستم مکانیکی ساده شده به المان اندرکنش اضافه می شود.

### ۴-۲-۲ مدل بر اساس سری‌های هارمونیک

این مدل از تحلیل دینامیکی مستقیم با انتگرال‌گیری در حوزه زمان پیروی می کند. این روش تنها برای پلهای با دو تکیه گاه ساده کاربرد دارد و پاسخ سازه تحت بارگذاری های دیگر را با ترکیب سری های هارمونیک و ایجاد یک حد بالا که از جمع آنها حاصل شده است، محاسبه می کند. این مدل مفهوم دیگری به نام



شکل ۶. دو مدل اندر کنش پیشنهادی [۶]

مرکب قوسی است. دال های پیش تنیده دارای دهانه ۵۰ متری بوده و به صورت ساده روی تکیه گاه قرار دارند. مقطع این پل ها U شکل است که در واقع تیپ اصلی مقاطع پل در خطوط مخصوص قطارهای سریع کشور بلژیک است، مقطع و ابعاد این پل در شکل (۷) مشخص شده اند.

### ۲-۳ الگوی بار قطار Thalys

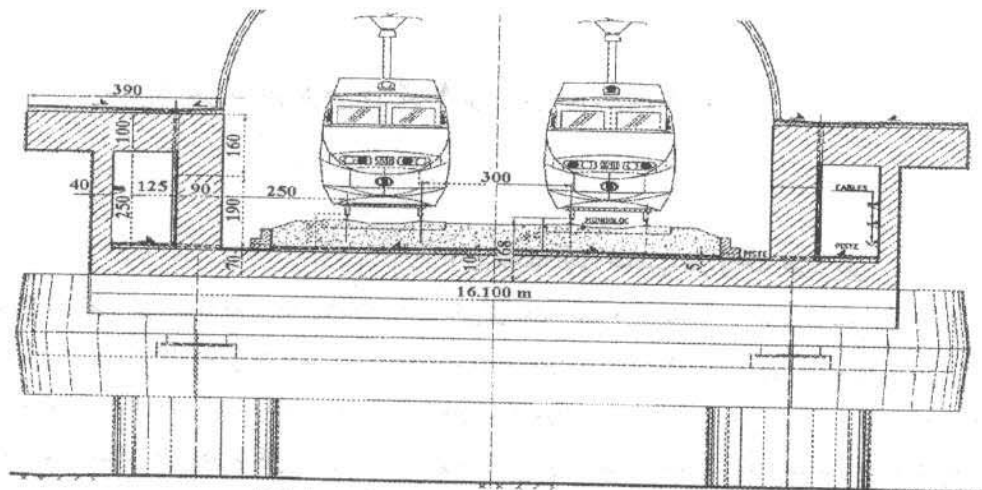
قطاری که از روی پل می گذرد Thalys نام دارد. جدول (۱) بارهای هر محور قطار و مقدار جرم غیر معلق مربوط به آن را نشان می دهد.

### ۳. کالیبراسیون مدل

برای بررسی اثر سرعت در پل ابتدا باید مدل اجزای محدود را با توجه به نتایج آزمایش منطقه ای پل که در زیر آمده کالیبره کرد.

#### ۱-۳ مشخصات هندسی پل

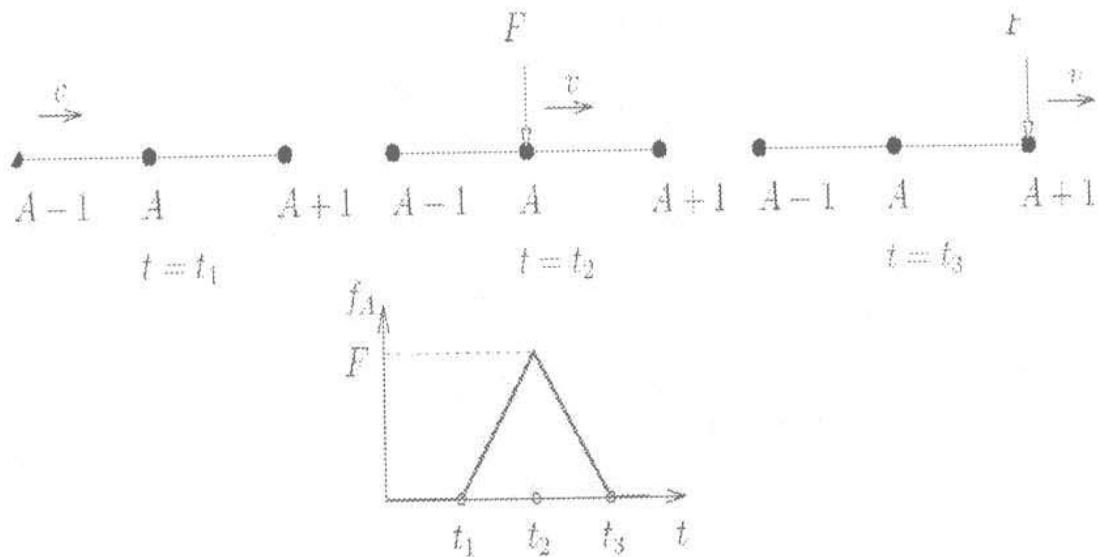
این آزمایش بر روی پل Antoining که در خط مخصوص قطارهای سریع پاریس - بروکسل قرار دارد انجام شده است. نتایج این آزمایش توسط H. Xia و همکاران در مجله SOUND AND VIBRATION در سال ۲۰۰۳ به چاپ رسیده است [9]. این پل شامل ۵ دهانه با دال پیش تنیده بتنی و یک دهانه



شکل ۷. مقطع پل Antoining [۹]

جدول ۱. بارهای محوری و جرم های غیر معلق قطار Thalys [۸]

شماره محور	موقعیت (mm)	بار (kn)	جرم غیر معلق (kg)
1	0	166.6	1732
2	3000	166.6	1732
3	14,000	166.6	1732
4	17,000	166.6	1732
5	20,267	142.1	1826
6	23,267	142.1	1826
7	38,967	142.1	1826
8	41,967	166.6	1830
9	57,667	166.6	1830
10	60,667	166.6	1830
11	76,367	166.6	1830
12	79,367	166.6	1830
13	95,067	166.6	1830



شکل ۸. تعریف بار گره‌ی در گره A برای بار منفرد متحرک F

### ۳-۳ معرفی مدل

ساده‌ترین فرایند برای مدل کردن قطار، این است که در طول زمان بار را روی گره‌ها حرکت دهیم، در یک گام زمانی مشخص بار به یک گره اختصاص داده می‌شود و مقدار باری که به گره وارد می‌شود به فاصله محور بار تا گره بستگی دارد. در شکل (۸) بار وارده به گره A دیده می‌شود.

با توجه به این که جرم قطار قابل ملاحظه است، برای مدل سازی پل از تیر عمیق (تیر تیموشنکو) استفاده می‌شود. این جزء با در نظر گرفتن تأثیر اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی از دقت بیشتری برخوردار و به واقعیت نزدیک تر است. از این مدل در مواردی که ابعاد سطح مقطع در مقابل طول تیر کوچک نبوده، یا ماده بکار رفته در تیر به تغییر شکل‌های برشی حساس و یا فرکانس تحریک بزرگ باشد، استفاده می‌شود.

برای حل مساله عبور بار قطار ها از پل از تحلیل گذرا استفاده می‌شود. به کمک نرم افزار ANSYS می‌توان معادلات وابسته به زمان را به روش نیو مارک حل کرد. در این نرم افزار بعد از تعیین اجزا در واحد طول برای مدل کردن سرعت های مختلف، مدت زمان لازم برای طی کردن بار در طول یک جزء در هر زیر فاصله (Substep) در دستور Time وارد می‌شود. ایجاد هندسه مدل با گره‌های متعدد و بارگذاری بار محوری قطارها به کمک قابلیت برنامه نویسی APDL در نرم افزار ANSYS انجام می‌شود [۱].

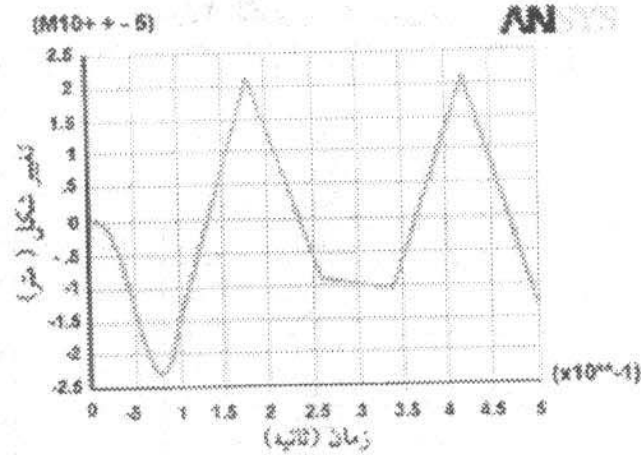
### ۴-۳ تعداد اجزا مناسب در واحد طول تیر

یکی از نکات مهم در شبیه سازی حرکت بار متحرک در روش اجزای محدود این است که تعداد اجزا به اندازه کافی باشد. در غیر این صورت ممکن است به پاسخ واقعی نرسیم. تعداد اجزا در راستای طولی بستگی به سرعت حرکت بار متحرک دارد. اگر سرعت حرکت بار متحرک زیاد نباشد، تعداد کمتر اجزا خطای کمی ایجاد می‌کند، اما در سرعت‌های زیاد تعداد نامناسب اجزا در واحد طول تیر، مسأله را از پاسخ واقعی دور می‌کند. برای مثال جابه جایی وسط دهانه برای قطار مدل سازی شده در سرعت ۱۵۰ متر بر ثانیه با تعداد ۱۰۰ و ۳۰۰ جزء در واحد طول تیر در اشکال (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است.

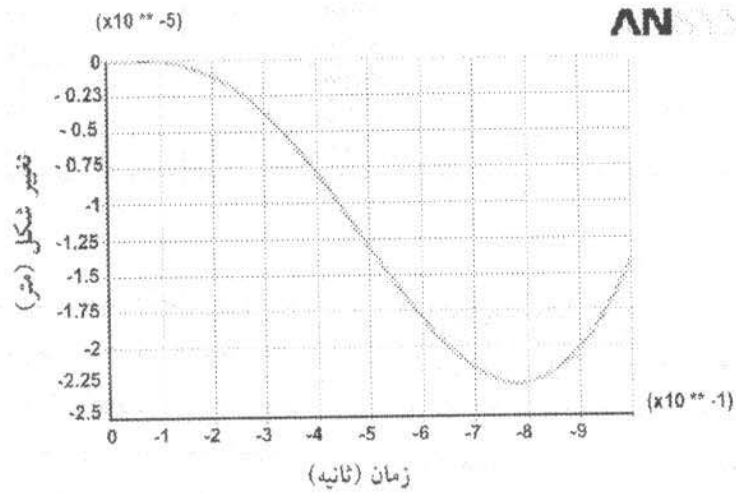
### ۵-۳ مقایسه مدل با نتیجه آزمایش پل

پل Antoining با مشخصاتی که در شکل (۷) نمایش داده شده اند تحت بار قطار Thalys در سرعت‌های ۲۶۰ تا ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت آزمایش شد. مقایسه نتایج آزمایش و نتایج مدل در شکل (۱۱) مشخص شده اند که نشانگر تطابق مناسب نتایج آزمایش و تحلیل اجزای محدود است.

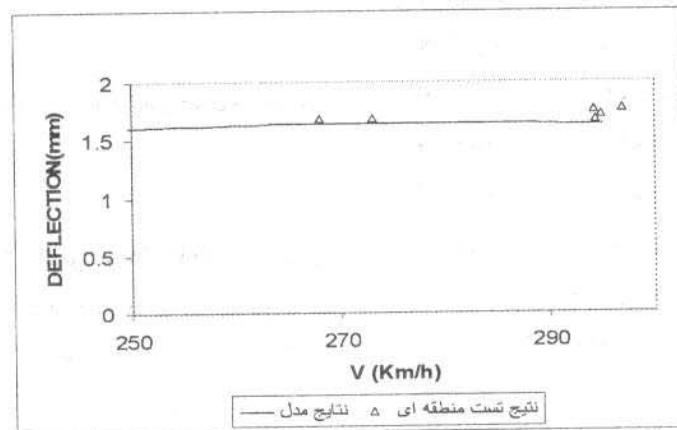




شکل ۹. جابجایی نقطه وسط با استفاده از ۱۰۰ جزء در سرعت ۱۵۰ m/s



شکل ۱۰. جابه‌جایی نقطه وسط با استفاده از ۳۰۰ جزء (و بیشتر) در سرعت ۱۵۰ m/s



شکل ۱۱. مقایسه نتایج مدل با آزمایش‌های منطقه‌ای

جدول ۲. الگوی بار کاربردی در مدل

AXLE NUMBER	POSITION(mm)	LOAD(TON)
1	0	18.5
2	1700	18.5
3	3720	18.5
4	12320	18.5
5	14340	18.5
6	16040	18.5
7	21100	18.5
8	22800	18.5
9	24820	18.5
10	33420	18.5
11	35440	18.5
12	37140	18.5
13	41320	19
14	43120	19
15	51280	19
16	53080	19
17	56380	19
18	58180	19
19	66340	19
20	68140	19

#### ۳-۴ تجزیه و تحلیل نتایج

با الگوی بار معرفی شده در بالا، پل های با دهانه های ۲، ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری مدل شدند و در سرعت های ۱/۲۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۳۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت مورد تحلیل قرار گرفتند. در این سرعت ها، سرعت ۰/۱ کیلومتر بر ساعت معادل بار استاتیکی در تحلیل ها گنجانده شد. در هر یک از دهانه ها و سرعت ها نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان، برش و لنگر خمشی در نقاط L/2، L/4 و روی تکیه گاه به عنوان خروجی به دست آمد. نمودارهای تغییرات ضریب افزایشده تغییر مکان با سرعت در دهانه های مختلف برای نقاط L/2 و L/4 در شکل های (۱۲) و (۱۳) آورده شده اند. این دو نمودار شباهت زیادی به هم دارند. برای بررسی بهتر، می توان پلها را به سه دسته تقسیم کرد.

۱- پلهای کوتاه: در این گروه پل های با طول کمتر از ۲۰ متر قرار دارند. در این مورد، نمودارها دارای مقادیر بیشینه مقطعی هستند و در سرعت های بیشتر، ضرایب افزایشده بزرگ تری مشاهده می شود. حداکثر این ضریب افزایشده ۱/۱۳ است.

۲- پلهای متوسط: در این گروه پل های با طول ۲۰ تا ۶۰ متر قرار می گیرند. در این دسته تفکیکی در سرعت های مختلف وجود

هدف از این تحقیق محاسبه ضریب افزایشده دینامیکی مربوط به سرعت است. در نتایج آزمایش پل ضریب افزایشده دینامیکی از تقسیم تغییر مکان پل در سرعت ۲۹۵ کیلومتر بر ساعت بر تغییر مکان استاتیکی پل معادل ۱/۲۵ حاصل شده است. ضریب افزایشده دینامیکی تغییر مکان در این مدلسازی ۱/۱۸ به دست آمد که تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش دارد.

#### ۴. توسعه نتایج مدل

##### ۱-۴ مشخصات پل

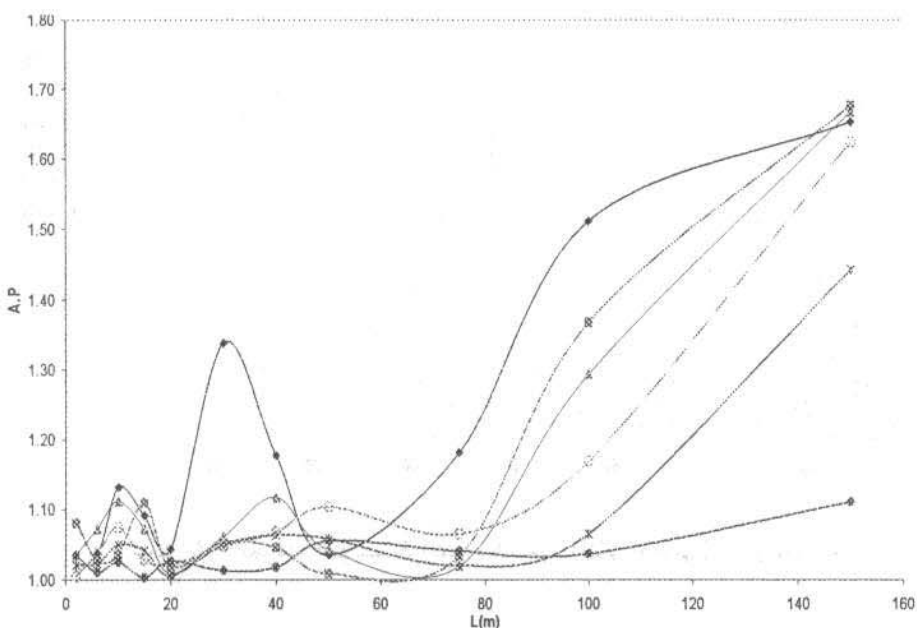
مشخصات پل مورد نظر در این مطالعه موردی همان مشخصات پل Antoining است.

##### ۲-۴ الگوی بار اعمالی

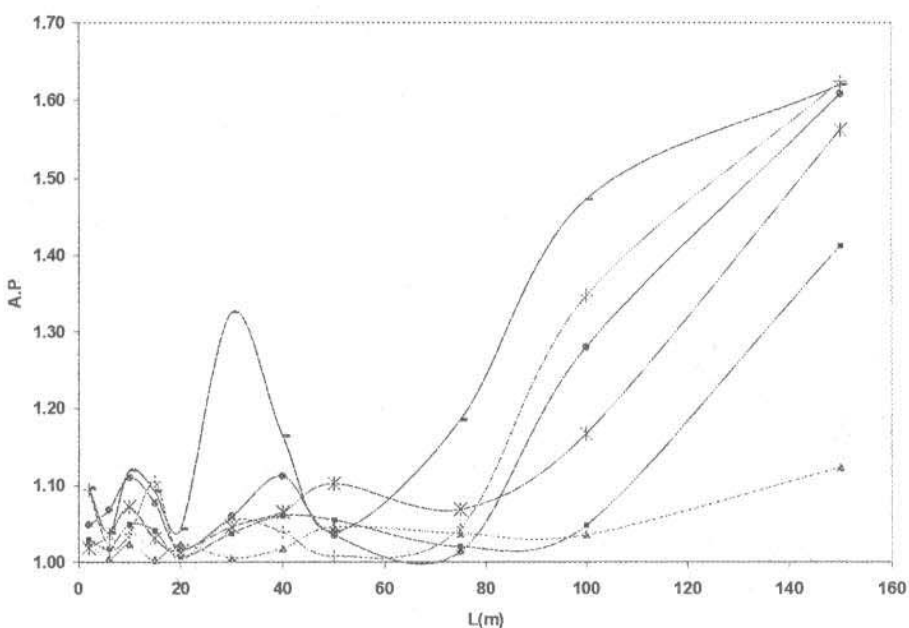
الگوی بار اعمالی مربوط به ۲ لوکوموتیو GT 26 و دو مخزن است که سنگین ترین بار موجود در قطار های باری کشور است. طول مورد نظر قطار در تحلیل ۶۸/۱۴۰ متر فرض شده و بار هر محور در لوکوموتیو معادل ۱۸/۵ تن و در مخزن ۱۹ تن است. الگوی بار مورد نظر با جزئیات مربوطه در جدول (۲) مشخص شده است.

۳- پلهای بلند: پل های با طول بیش از ۶۰ متر در این دسته بندی قرار می گیرند. همان گونه که در شکل های ۱۲ و ۱۳ مشخص است، با افزایش دهانه از ۶۰ متر به بالا، ضریب افزایشده دچار صعود قابل ملاحظه ای شده است. با افزایش دهانه به بیش از ۶۰ متر، در تمامی سرعتها نمودارها تقریباً صاف شده اند، البته در این بازه در سرعتهای مختلف، تفاوت ضریب افزایشده با یکدیگر قابل ملاحظه است. حداکثر ضریب افزایشده در این قسمت ۱/۶۷ است.

هستند و در سرعت های بیشتر، ضرایب افزایشده بزرگ تری مشاهده می شود. حداکثر این ضریب افزایشده ۱/۱۳ است.  
 ۲- پلهای متوسط: در این گروه پل های با طول ۲۰ تا ۶۰ متر قرار می گیرند. در این دسته تفکیکی در سرعتهای مختلف وجود ندارد و نمودار دچار بی نظمی شده است. حداکثر ضریب افزایشده در این قسمت ۱/۳۳ است. البته با الگوی بار عبوری و مشخصات مقطع خاص این پل ها، به نظر می رسد که پل ۳۰ متری در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت دچار رزونانس شده است.



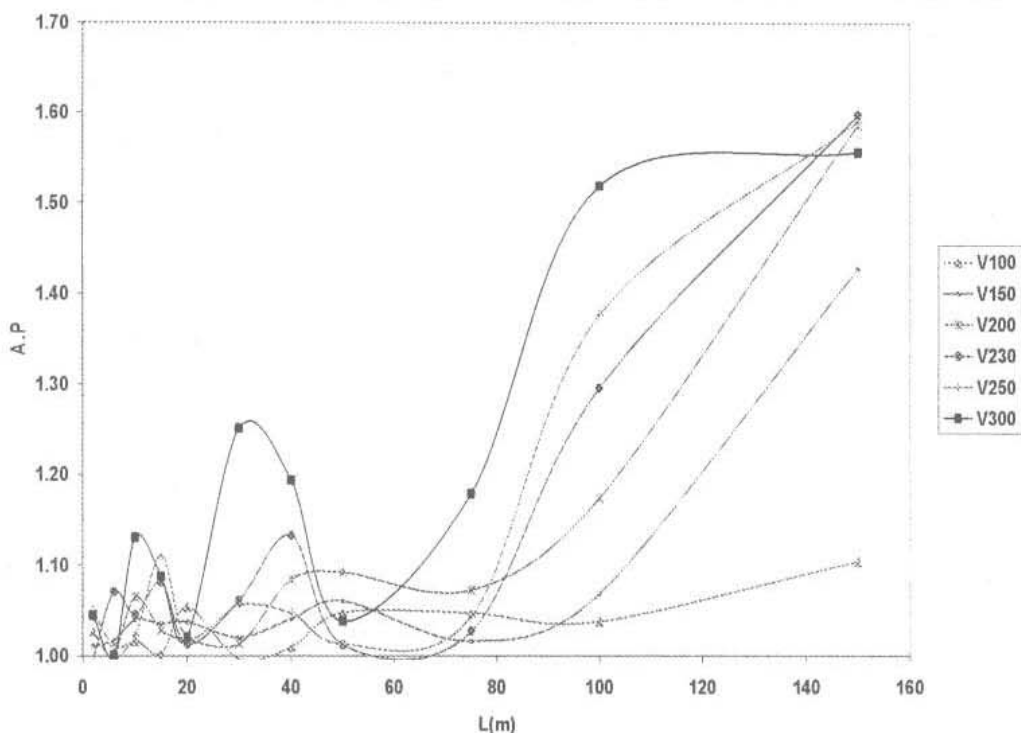
شکل ۱۲. نمودار ضریب افزایشده دینامیکی (تغییر مکان) در وسط دهانه



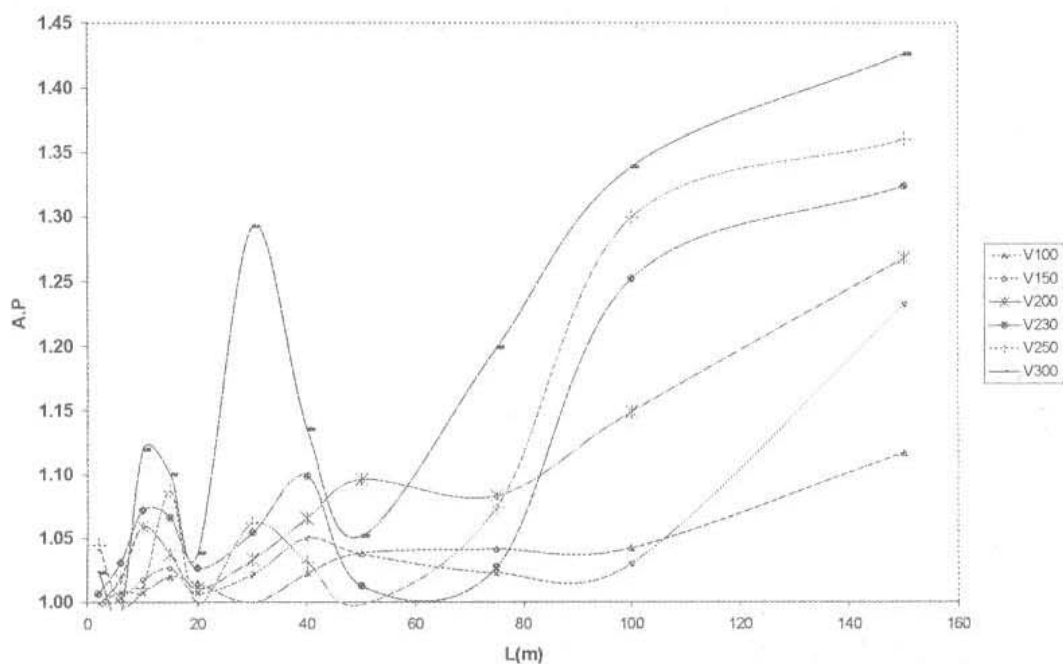
شکل ۱۳. نمودار ضریب افزایشده دینامیکی (تغییر مکان) در نقطه L/4

افزاینده تغییر مکان و لنگر خمشی، مشخص است که پیل ۳۰ متری در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت دچار رزونانس شده است. نمودار تغییرات ضریب افزایش لنگر خمشی به صورت تابعی از سرعت در دهانه های مختلف برای نقاط  $L/4$  و  $L/2$  در شکل های (۱۴) و (۱۵) نمایش داده شده اند.

روند تغییرات ضریب افزایش دینامیکی (لنگر خمشی)، بسیار شبیه به تغییرات (افزایش و کاهش) ضریب افزایش تغییر مکان است و می توان همان دسته بندی پلها به سه گروه کوتاه، متوسط و بلند را اعمال کرد. البته واضح است که مقادیر مربوط به ضریب افزایش تغییر مکان بحرانی ترند. با توجه به نمودار ضریب



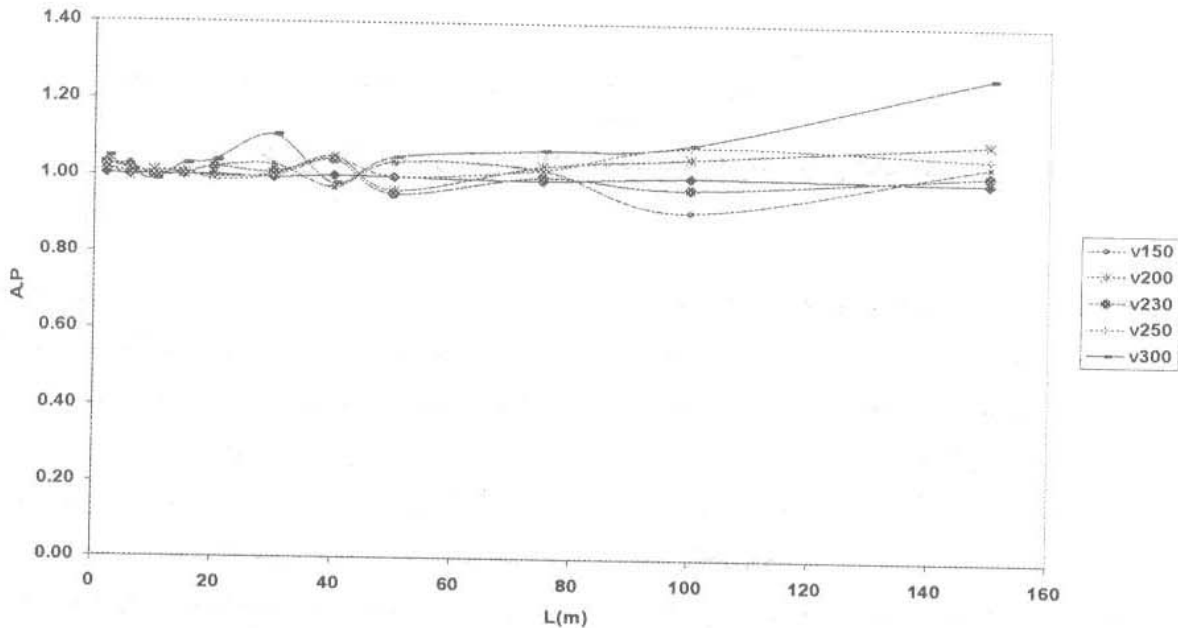
شکل ۱۴. نمودار ضریب افزایش دینامیکی (لنگر خمشی) در وسط دهانه



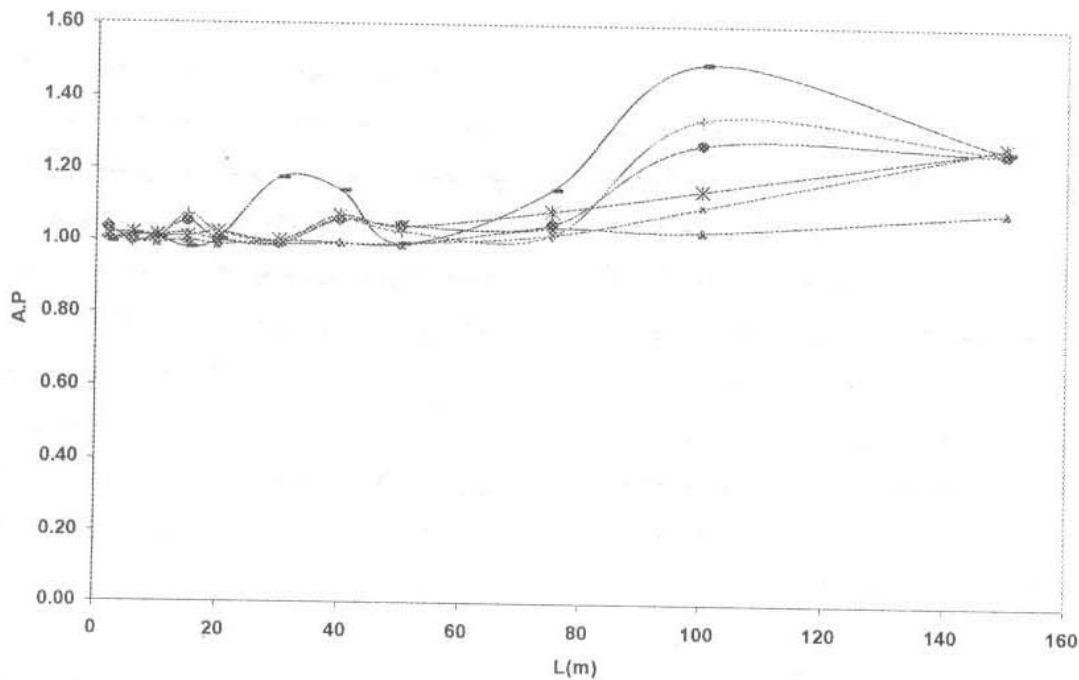
شکل ۱۵. نمودار ضریب افزایش دینامیکی (لنگر خمشی) در نقطه  $L/4$

است ، مقادیر مربوط به نقطه  $L/4$  که ما بین تکیه گاه و وسط تیر قرار دارد بیشتر است . بنابراین نقطه بحرانی در برش با توجه به بار عبوری در فاصله ای از بر تکیه گاه قرار دارد. تعیین نقطه بحرانی برش مستلزم بررسی نتایج در نقاط بیشتری است. نکته دیگر این که در دهانه ۳۵ متری و سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، رزونانس در مقادیر مربوط به برش هم دیده می شود.

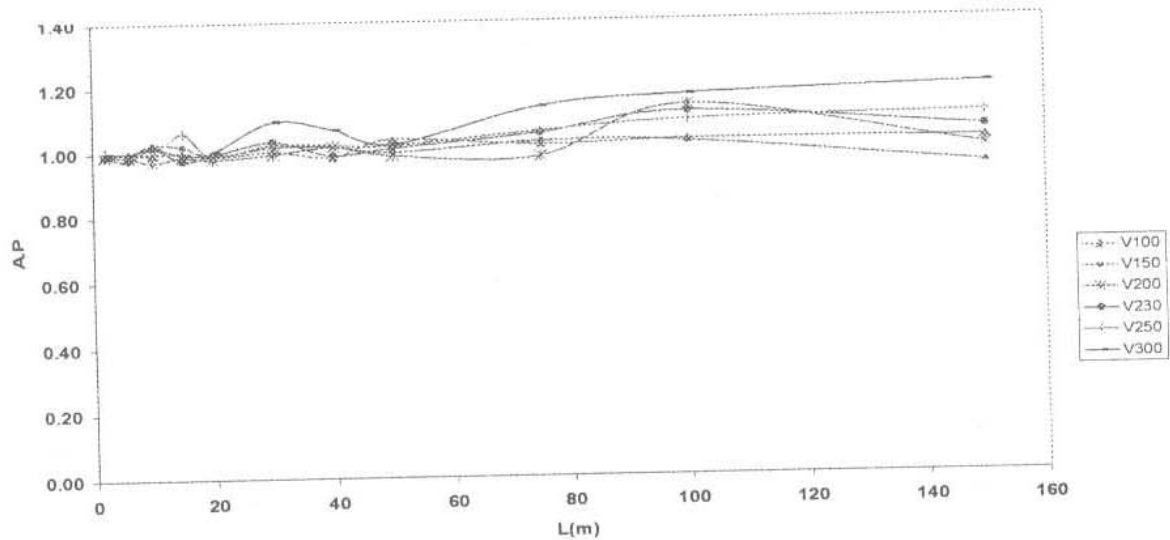
برای بررسی اثر سرعت های زیاد در برش ایجادشده در پل ، نمودارهای تغییرات ضریب دینامیکی (برش) به صورت تابعی از سرعت و طول دهانه در نقاط وسط دهانه ، تکیه گاه و یک چهارم دهانه در شکلهای (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) نمایش داده شده اند . همان گونه که در اشکال فوق دیده می شود ، ضریب افزایش دینامیکی (برش) از دو ضریب دینامیکی تغییر مکان و لنگر خمشی کمتر است . در سه نقطه که در آنها تحلیل انجام شده



شکل ۱۶. نمودار ضریب افزایش دینامیکی (برش) در وسط دهانه



شکل ۱۷. نمودار ضریب افزایش دینامیکی (برش) در نقطه  $L/4$



شکل ۱۸. نمودار ضریب افزایش دینامیکی (برش) روی تکیه‌گاه

در این رده پل های با طول دهانه ۲۰ تا ۶۰ متر قرار می‌گیرند. در این دسته نمودار دچار بی نظمی شده است. حداکثر ضریب افزایش در این قسمت ۱/۳۳ است. البته با الگوی بار عبوری و مشخصات مقطع خاص، این پل ۳۰ متری در سرعت ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت دچار رزونانس شده است.

#### پ- پلهای بلند:

پل های با طول دهانه بیشتر از ۶۰ متر در این دسته بندی قرار می‌گیرند. با افزایش دهانه از طول ۶۰ متر به بالا ضریب افزایش دچار افزایش قابل ملاحظه ای شده است و در تمامی سرعت ها، نمودار ها تقریباً صاف شده اند. حداکثر ضریب افزایش در این قسمت ۱/۶۷ است.

۴- پلهای کوتاه در سرعت های زیاد دچار تشدید شده اند، به عبارت دیگر در سرعت های زیاد نمودار ضریب افزایش دینامیکی یک حداکثر پیدا کرده است. البته مقادیر این ضریب در مقایسه با پلهای بلند به مراتب کمترند.

۵- پلهای بلند با افزایش سرعت دچار سیر صعودی قابل ملاحظه ای در مقادیر ضریب افزایش شده اند.

۶- مقادیر ضریب افزایش دینامیکی مربوط به برش از دو ضریب دیگر کمترند. بیشترین مقدار این ضرایب در تحلیل ۱/۴۹ به دست آمده است. در سه نقطه که در آنها تحلیل انجام شده است، مقادیر ضریب مربوط به نقطه  $L/4$  که مابین تکیه گاه و وسط تیر قرار دارد بیشترند. بنابراین نقطه بحرانی در برش یا توجه به بار عبوری در فاصله ای از محل تکیه گاه قرار دارد.

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق با مدل سازی و کالیبراسیون های مختلف، بیش از ۳۰۰ تحلیل با سرعتها و طول دهانه های مختلف انجام گرفته که نتایج آنها را می توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- ضریب افزایش دینامیکی برای سه حالت تغییر مکان، برش و لنگر خمشی بررسی شد و در نهایت این نتیجه به دست آمد که ضریب افزایش مربوط به تغییر مکان از دو حالت دیگر بحرانی تر است. حداکثر ضریب افزایش (تغییر مکان) معادل ۱/۶۷ به دست آمد. البته بعد از ضریب مربوط به تغییر مکان، نتایج مربوط به لنگر خمشی به ضرایب بیشتری منجر می شوند.

۲- نمودارهای مربوط به تغییرات ضریب افزایش دینامیکی و سرعت در دهانه های مختلف، نشان دادند که روند تغییرات (افزایش و کاهش) و مقادیر بیشینه مربوط به ضریب دینامیکی تغییر مکان و لنگر خمشی بسیار به هم نزدیکند.

۳- در بحث رفتار پل های راه آهن به صورت تابعی از تغییرات سرعت، با توجه به مقادیر به دست آمده برای ضریب افزایش، پل ها را می توان به سه دسته تقسیم کرد:

#### الف - پلهای کوتاه:

در این رده پل های تا طول دهانه ۲۰ متر قرار دارند. در این دسته، نمودار مقادیر بیشینه مقطعی دارد و در سرعت های بیشتر، ضرایب افزایش بزرگ تری مشاهده می گردد. حداکثر این ضریب افزایش ۱/۱۳ است.

#### ب - پلهای متوسط:

6- James, J. (2003) "Analysis of traffic load effects on railway bridges .", Thesis presented to the University of Royal Institute of Technology , Stockholm, Sweden, in partial fulfillment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy.

7- Profillidis, V.A. (1996) "Railway engineering".

8- Xia,H., De Roeck, G., Zhang,N. (2003 ) "Dynamic analysis of high speed railway bridge under articulated trains ", Journal of Computers and Structures , 81, p. 2467-2478.

9- Xia,H., De Roeck, G., Zhang,N., Maeck,J. (2003) "Experimental analysis of a high-speed railway bridge under Thalys train ", Journal of Sound and Vibration, 268, p. 103-113.

10- Zacher, M., Amborgi, F., Fassbender, F. (2002) "Dynamics of a train over a flexible bridge", 15th European Adams User Conference.

1- Swanson Analysis Systems Inc. (2001), ANSYS User's Manual, Version 6.1, Swanson Analysis Systems Inc.

2- American Railway Engineering Association (1994), "Manual for railway engineering, chapter 8, (Concrete structure and foundation)", American Railway Engineering Association.

3- European Committee for Standardization - (2002) pr EN 1991-2: EUROCODE 1- "Action on structures, part 2: Traffic loads on bridges".

4- Fryba, L. (1996) "Dynamics of railway bridges", Thomas Telford.

5- Goicolea, J. M., Dominguez, J., Navarro, J. A., Gabaldon, F. (2002) "New dynamic analysis method for railway bridges in codes IAPF and EURO CODE" railway bridges design, construction and maintenance, Spanish Group of IABSE, Madrid, 12-14 June 2002.