

تحلیل دینامیکی پلهای خرپائی فولادی تحت اثر حرکت قطار

جبار علی ذاکری، استادیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
He Xia, Department of Civil Engineering, Northern Jiaotong University, Jiatong, China
E-Mail: Zakeri@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله مدل تحلیلی سیستم قطار - پل تحت اثر پدیده هانتینگ قطار و تحریک سیستم ارائه شده است. معادلات تعادل سیستم قطار - پل به دست آمده و نرم افزار رایانه ای برای حل مسئله تهیه شده است. تاریخچه زمانی برای عبور قطار از روی پل به وسیله رایانه شبیه سازی شده است. واکنش های دینامیکی خرپا و توزیع آنها برحسب سرعت قطارها محاسبه شده و با نتایج اندازه گیری های آزمایشگاهی مقایسه گردیده اند. نتیجه گیری خاص بر روی مسائل سه بعدی زوج قطار که معمولاً هنگام عبور قطاری در سرعت های ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر در ساعت در پل خرپایی دو خطه به وجود می آید، متمرکز شده است. نتایج محاسبات نشان می دهند که حرکت هانتینگ چرخ و محورهای قطار و تغییر شکل تیر طولی خرپا نقش مهمی در ارتعاشات سیستم قطار - پل ایفا می کنند. در سرعت های معینی، فرکانس های تحریک نزدیک به مقادیر فرکانس های طبیعی خرپا شده و پدیده رزونانس اتفاق می افتد. در چنین حالتی هم واکنش های جانبی و هم قائم با هر دو تشدید می شوند. همچنین برای پل خرپایی دو خطه، ارتعاشات جانبی و قائم در هنگام عبور قطار از یک خط با یکدیگر در گیر (مرتبط) می شوند. ارتعاشات پیچشی به وجود آمده از بارگذاری خارج از محور، باعث بزرگتر شدن تغییر مکان های جانبی و دامنه آنها می شوند. به این ترتیب لازم است که در تحلیل دینامیکی و طراحی پل راه آهن سریع السیر این موضوع مورد نظر قرار گیرد.

واژه های کلیدی: اندرکنش پل - قطار، دینامیک پلهای راه آهن، سرعت قطار، پل های خرپایی

۱. مقدمه

قرار دارد صحیح نیست [3,4]. هدف این مقاله توسعه یک مدل سه بعدی برای سیستم پل خرپایی دو خطه قطار و مطالعه اثرات متقابل آنها تحت بارگذاری یکطرفه است.

۲. مدل سیستم پل - قطار و معادلات دینامیکی

۲-۱ مدل دینامیکی سیستم پل - قطار

مدل تحلیلی سه بعدی اندرکنش پل - قطار، یک سیستم دینامیکی است که از مدل وسیله نقلیه ریلی و مدل پل که به وسیله ارتباط ریل - چرخ به یکدیگر متصل شده اند، تشکیل می شود [5].

با افزایش سرعت قطارها، پل ها تحت تأثیر ضربه های بزرگ تری قرار می گیرند. تلاش های قابل ملاحظه ای در کشورهای مختلف، به منظور تفهیم بهتر رفتار دینامیکی پلها تحت اثر بارهای متحرک قطار صورت گرفته اند [1]. از مرور بر جزئیات فعالیتهای گذشته در این مقاله صرف نظر شده است و علاقه مندان می توانند به منابع [2,3] مراجعه کنند.

متون فنی نشان می دهند که به علت سادگی، اغلب پلها را می توان برای ارتعاشات جانبی و قائم به صورت جداگانه مورد بررسی قرار داد. ثابت شده است که این نتیجه گیری برای پلهای دوخطه در حالتی که فقط یک قطار بر روی یکی از خطوط

۲-۱-۱ مدل سه بعدی وسیله نقلیه ریلی

مدل وسیله نقلیه ریلی می تواند به صورت قطاری متشکل از چند لوکوموتیو و واگن یا ترکیبی از آنها باشد و بر اساس فرضیه های زیر مدل سازی شود:

- از اثرات تغییر شکل های کشسان بدنه واگنها، چرخ و محور چشم پوشی می شود.
- تمامی لوکوموتیوها و وسائط نقلیه ریلی با سیستم های تعلیق فنر و کمک فنر؛ ساده سازی می شوند. سختی فنر و ضریب استهلاک کمک فنر بوژی در میان چرخ و محورهای آن قرار می گیرد.
- از ارتعاشات بدنه واگن، قابهای بوژی و چرخ و محور حول محور طولی چشم پوشی می شود. ساختار هر بدنه واگن از ۵ درجه آزادی (حرکت جانبی Y_i ، رولینگ θ_i ، یاوینگ ψ_i ، حرکت حول محور قائم Z_i و دوران حول محور Y ، ϕ_i) و همچنین چرخ و محور با سه درجه آزادی (شامل حرکت جانبی Y_w ؛ رولینگ θ_w ، حرکت حول محور قائم Z_w) مشخص می شوند.

بنابراین کل تعداد درجات آزادی لوکوموتیو شش محوره و واگنهای چهار محوره به ترتیب برابر بیست و سه (۲۳) و هفده (۱۷) است [5].

مدل سازی لوکوموتیو شش محوره در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۲ مدل پل

پل مورد مطالعه یک پل خربایایی فولادی دو خطه است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که برای یک پل دو خطه بایستی مدل فضایی مورد استفاده قرار گیرد تا ارتعاشات پیچشی - جانبی و قائم در هنگام عبور قطاری از یک خط و ترکیب آنها مورد بررسی قرار گیرند. تحلیل فشرده مودال برای مدل سازی سیستم پل - خط استفاده می شود تا محاسبات مربوط به درجات آزادی کاهش یابند.

ابتدا فرکانس های ارتعاشات آزاد و موده های ارتعاشی سیستم محاسبه می شوند. به علت همبستگی مودها، صدها معادله دیفرانسیل تعادل دینامیکی را که با یکدیگر ممزوج شده اند؛ می توان تفکیک کرد و این عمل مدل محاسباتی پل را به صورت جمع آثار معادلات مستقل مودال در می آورد.

با توجه به این واقعیت که واکنش دینامیکی هر سازه غالباً تحت تأثیر کوچک ترین موده های ارتعاشی قرار می گیرد، این تقریب دارای مزایای زیادی است که با آن تخمین مناسب واکنش دینامیکی، به وسیله تعداد کمی از موده های ارتعاشی به دست می آید و این روش برای سیستم های سازه ای فضایی با صدها درجه آزادی بسیار موثر و اقتصادی است و به این ترتیب اثرات محاسباتی در نتایج محاسبات کاهش می یابند. فرضیه های زیر برای مدل پل منظور می شوند:

۱- تغییر مکان نسبی بین خط و تیر اصلی پل وجود ندارد. از اثرات کشسان صفحات لاستیکی زیر ریل و پابندها چشم پوشی می شود.

۲- مودال برای کل پل صورت می گیرد، به طوری که موده های ارتعاشی گره های تیر اصلی به صورت موده های عرشه پل منظور می شوند. شکل های مودها ی بین گره ها به وسیله درونیابی لاگرانژ به دست می آیند.

۳- از تغییر شکل مقطع عرضی تیرهای اصلی چشم پوشی شده است، به این ترتیب حرکت آنها در هر مقطع به وسیله تغییر مکان جانبی Yb ، دوران θb ، و تغییر مکان قائم Zb تعیین می شود (شکل ۱).

هنگامی که اولین مود Nq در نظر گرفته می شود، می توان آنها را با استفاده از اصل جمع مودها به شرح زیر بیان کرد [4]:

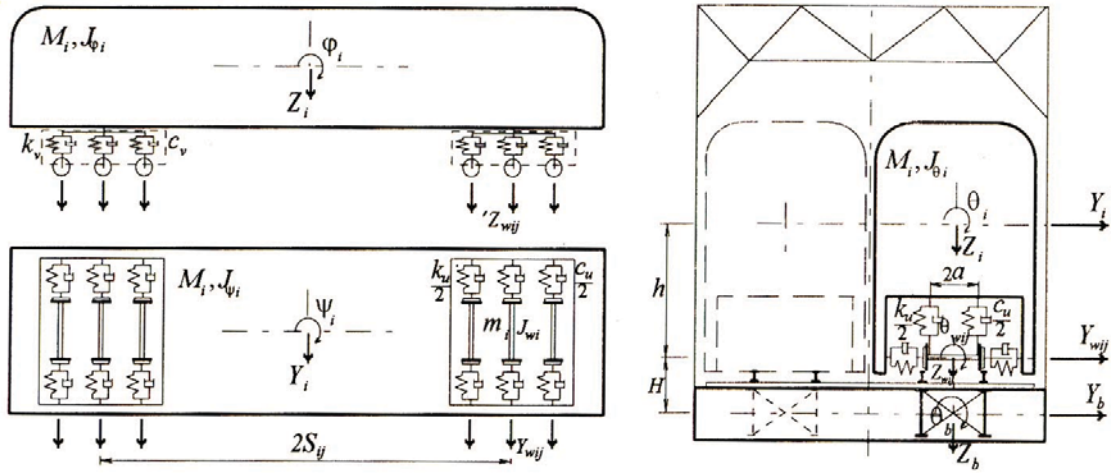
$$Y_b(x) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n \phi_n^n(x); \quad (1)$$

$$\theta_b(x) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n \phi_{\theta}^n(x); \quad Z_b(x) = \sum_{n=1}^{N_q} q_n \phi_z^n(x)$$

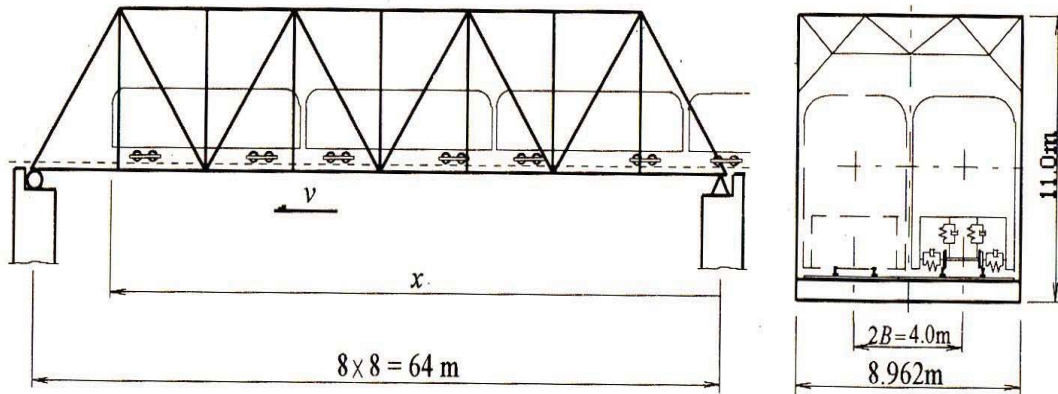
که در آن ϕ_{θ}^n ، ϕ_z^n و ϕ_v^n به ترتیب برابر تابع مقادیر اجزاء پیچشی؛ جانبی و قائم n امین مود پل در محل i امین چرخ i امین وسیله نقلیه بوده و q_n مختصات تعمیم یافته دامنه مودال است.

هنگام استاندارد کردن موده های ارتعاشی بر اساس $\phi_n^T m \phi_n = 1$ (که در آن m ماتریس جرم سازه ϕ_n شکل مود n ام است)، معادله دینامیکی مود n ام برابر خواهد شد با:

$$\ddot{q} + 2\omega \xi \dot{q} + \omega^2 = \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{N_{bj}} [\phi_{uij}^n F_{uij} + \phi_{\theta ij}^n F_{\theta ij} + \phi_{vij}^n F_{vij}] \quad (2)$$



شکل ۱. مدل دینامیکی لوکوموتیو شش محوره



شکل ۲. مدل دینامیکی سیستم پل - قطار

تغییر می کنند. برای حل این مسئله و مجموعه معادلات فوق الذکر، از روشهای عددی و اغلب روش حذفی استفاده می شود. در متون فنی [7] معادلات لاگرانژ نیز برای تحلیل سیستم های پل - قطار مورد استفاده قرار گرفته اند.

این روش به دلیل افزایش تعداد مجهولات، محاسبات را طولانی تر می سازد.

ناهمواری های ریل و حرکت گهواره ای چرخ به صورت منابع تحریک ارتعاشات سیستم پل - قطار فرض می شوند. بر اساس این فرضیه ها، حرکت چرخ و محور (Y_w, θ_w, Z_w) و تغییر

که در آن F_{vij} و $F_{uij}, F_{\theta j}$ برابر لنگر خمشی، نیروی جانبی و نیروی قائم وارده بر پل از طریق i امین چرخ i امین وسیله نقلیه هستند.

۳-۱-۲ ارتباط چرخ - خط

نیروهای اندرکنشی موجود در نقطه تماس مابین دو سیستم فرعی هستند که دو مجموعه معادلات، سیستم پل و سیستم وسیله نقلیه ریلی را به یکدیگر مرتبط می سازند. مشکلی که در این حالت وجود دارد این است که نقاط تماس ثابت نیستند و در بازه زمانی

که در آن Y_s ، θ_s و Z_s به ترتیب تغییر مکانهای جانبی، پیچشی و قائم چرخ نسبت به ریل بوده و نشان دهنده حرکات گهواره ای چرخ، ناهمواریهای جانبی و قائم ریل روی پل هستند. از معادله فوق چنین بر می آید که حرکات چرخ و محورها را می توان به صورت جمع خطی مختصات مودال تعمیم یافته پل q_n ($n=1,2,\dots,N_q$) بیان کرد. به این ترتیب آنها مستقل از سیستم پل - قطار تحلیل می شوند [6].

مکانهای تیر طولی (Y_b, θ_b, Z_b) به صورت زیر به یکدیگر مرتبط می شوند [5].

(۳)

$$\begin{Bmatrix} Y_{wij} \\ \theta_{wij} \\ Z_{wij} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y_b(x_{ij}) + H_i \theta_b(x_{ij}) + Y_s(x_{ij}) \\ \theta_b(x_{ij}) + \theta_s(x_{ij}) \\ Z_b(x_{ij}) + B \theta_b(x_{ij}) + Z_s(x_{ij}) \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{N_q} \begin{Bmatrix} q_n (\phi_{uij}^n + H_i \phi_{\theta ij}^n) + Y_s(x_{ij}) \\ q_n \phi_{\theta ij}^n + \theta_s(x_{ij}) \\ q_n (\phi_{vij}^n + B \phi_{\theta ij}^n) + Z_s(x_{ij}) \end{Bmatrix}$$

۲-۲ معادلات دینامیکی سیستم پل - قطار

معادلات تعادل دینامیکی سیستم پل - قطار به وسیله جمع معادلات وسیله نقلیه، معادلات پل و ارتباط چرخ - خط به دست می آیند [3]:

$$\begin{bmatrix} M_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{\theta i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{\psi i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{\phi i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Y}_i \\ \ddot{\theta}_i \\ \ddot{\psi}_i \\ \ddot{Z}_i \\ \ddot{\phi}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ui} & -hC_{ui} & 0 & 0 & 0 \\ -hC_{ui} & C_{\theta i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{\psi i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{vi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\phi i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{Y}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{\psi}_i \\ \dot{Z}_i \\ \dot{\phi}_i \end{Bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} K_{ui} & -hK_{ui} & 0 & 0 & 0 \\ -hK_{ui} & K_{\theta i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{\psi i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{vi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{\phi i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_i \\ \theta_i \\ \psi_i \\ Z_i \\ \phi_i \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^{N_{wj}} \sum_{n=1}^{N_q} \left\{ \begin{array}{l} [\phi_{uij}^n + H_i \phi_{\theta ij}^n] (k_{ui} q_n + c_{ui} \dot{q}_n) \\ 0.5 \phi_{\theta ij}^n a^2 (k_{vi} q_n + c_{vi} \dot{q}_n) - H \phi_{uij}^n (k_{ui} q_n + c_{ui} \dot{q}_n) \\ \eta_j S_{ij} \phi_{uij}^n (k_{ui} q_n + c_{ui} \dot{q}_n) \\ \phi_{vij}^n (k_{vi} q_n + c_{vi} \dot{q}_n) \\ \eta_j S_{ij} \phi_{vij}^n (k_{vi} q_n + c_{vi} \dot{q}_n) \end{array} \right\} + \quad (۴)$$

$$+ \sum_{j=1}^{N_{wj}} \left\{ \begin{array}{l} k_{ui} Y_s(x_{ij}) + c_{ui} \dot{Y}_s(x_{ij}) \\ -h_i [k_{ui} Y_s(x_{ij}) + c_{ui} \dot{Y}_s(x_{ij})] + 0.5 a^2 [k_{vi} \theta_s(x_{ij}) + c_{vi} \dot{\theta}_s(x_{ij})] \\ \eta_j S_{ij} [k_{ui} Y_s(x_{ij}) + c_{ui} \dot{Y}_s(x_{ij})] \\ k_{vi} Z_s(x_{ij}) + c_{vi} \dot{Z}_s(x_{ij}) \\ \eta_j S_{ij} [k_{vi} Z_s(x_{ij}) + c_{vi} \dot{Z}_s(x_{ij})] \end{array} \right\}$$

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{N_{bi}} \sum_{m=1}^{N_q} - \{ (\Phi_{uij}^{nm} m_{wij} + \phi_{\theta j}^{nm} J_{wij} + \phi_{vij}^{nm} m_{wij}) \ddot{q}_m +$$

$$+ (\Phi_{uij}^{nm} c_{ui} + 0.5 \phi_{\theta j}^{nm} c_{vi} a^2 + \phi_{vij}^{nm} c_{vi}) \dot{q}_m + (\Phi_{uij}^{nm} k_{ui} + 0.5 \phi_{\theta j}^{nm} k_{vi} a^2 + \phi_{vij}^{nm} k_{vi}) q_m \} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{N_{bi}} \{ (\phi_{uij}^n + H_i \phi_{\theta j}^n) [k_{ui} (Y_i - h_i \theta_i) + c_{ui} (\dot{Y}_i - h_i \dot{\theta}_i) + \eta_i S_{ij} (k_{ui} \Psi_i + c_{ui} \dot{\Psi}_i)] +$$

$$+ 0.5 a^2 \phi_{\theta j}^n (k_{vi} \theta_i + c_{vi} \dot{\theta}_i) + \phi_{vij}^n [(k_{vi} Z_i + c_{vi} \dot{Z}_i) + \eta_i S_{ij} (k_{vi} \varphi_i + c_{vi} \dot{\varphi}_i)] +$$

$$+ [(\phi_{uij}^n + H_i \phi_{\theta j}^n) k_{ui} Y_s(x_{ij}) + 0.5 \phi_{\theta j}^n k a^2 \theta_s(x_{ij}) + \phi_{vij}^n k_{vi} Z_s(x_{ij})] + \phi_{vij}^n (m_{wij} g + 0.5 M_i g / N_{wi}) \}$$

$$(i=1,2,3,\dots,N_v, \quad n=1,2,3,\dots,N_q)$$

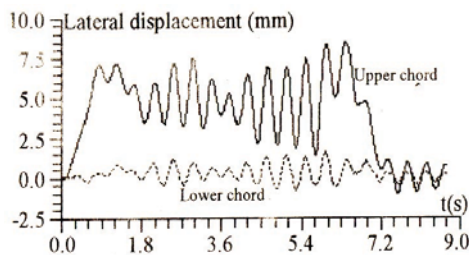
که در آن:

عبارت تقریبی زیر برای بیان حرکت گهواره ای مورد استفاده قرار گرفته است [3]:

$$Y_s = A_s \sin\left(\frac{2\pi v}{L_s} t + \zeta_k\right) \quad (5)$$

که در آن A_s و L_s دامنه و طول موج حرکت گهواره ای بوده و در محاسبات برابر ۳ میلی متر و ۲۰ سانتی متر فرض شده‌اند. همچنین ζ_k فاز اولیه تصادفی k امین بوژی و وسیله نقلیه است که با پخش یکنواخت $\pi \sim R(0, 2, \zeta_k)$ (مطابقت دارد). شکل ۳ تغییر مکان جانبی محاسبه شده برای گره های یال بالا و پائین خرابی را در حالی که سرعت قطار ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت منظور شده نشان می دهد.

شکل ۴ منحنی های دامنه تغییر مکان جانبی را پس از فیلتر کردن تغییر مکانهای جانبی نشان می دهد. در این عمل فرکانس برش فیلتر ۰.۵ هرتز منظور شده است. از این شکل چنین بر می آید که تغییر شکل جانبی شبه استاتیکی برای پل دوخطه زمانی اتفاق می افتد که فقط یک قطار از روی پل عبور کند و این در حالی است که اغلب واکنشهای جانبی بزرگی در پل ایجاد می شوند. تاثیر آن بر وتر بالایی به مراتب بیشتر از وتر پائینی است.



شکل ۳. منحنی های تغییر مکان جانبی

محور و وسیله نقلیه است. ضرایب استهلاک و سختی ماتریس استهلاک و ماتریس سختی به صورت زیر هستند:

$$C_{ui} = N_{wi} c_{ui}; C_{\theta} = N_{wi} (h^2 c_{ui} + 0.5 a^2 c_{vi}); C_{vi} =$$

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} S_{ij}^2 c_{ui}; C_{vi} = N_{wi} c_{vi}; C_{\varphi} = \sum_{j=1}^{N_{ij}} S_{ij}^2 c_{vi};$$

$$K_{ui} = N_{wi} k_{ui}; K_{\theta} = N_{wi} (h^2 k_{ui} + 0.5 a^2 k_{vi}); K_{vi} =$$

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} S_{ij}^2 k_{ui}; K_{vi} = N_{wi} k_{vi}; K_{\varphi} = \sum_{j=1}^{N_{ij}} S_{ij}^2 k_{vi};$$

پارامترهای دیگر در شکل های ۱ و ۲ ارایه شده اند.

چون در هنگام عبور قطار از روی خرابی ضرایب ϕ تغییر پیدا می کنند، معادلات دینامیکی سیستم خرابی - وسیله نقلیه به صورت معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه دوم با ضرایب متغیر زمانی خواهند بود.

معادلات به وسیله روش نیومارک β با $\beta = 1/4$ حل شده اند [1].

۳. مثال عددی

مثال عددی پل خرابی فولادی دو خطه در راه آهن گوانجو - شنجن در جنوب چین انتخاب شده است. ابعاد پل در شکل ۲ نشان داده شده اند. پارامترهای مودال به وسیله SAP 90 تحلیل شده اند. ۲۰ مود ارتعاشی در مدل پل ترکیب شده اند. حرکت گهواره ای چرخ و محورها به صورت منبع اصلی تحریک ارتعاشات جانبی - پیچشی سیستم پل - قطار عمل می کند.

سرعت قطار نمایش می دهند. بر اساس همین نتایج می توان نتیجه گرفت که برای چنین خرپای دو خطه ای همیشه با افزایش سرعت، واکنش دینامیکی افزایش نمی یابد. تمامی منحنی های واکنشهای بیشینه دارای نقاط اوجی در سرعت های مشخصی هستند که می توان آنها را رزونانس سرعت های قطار- پل نامید.

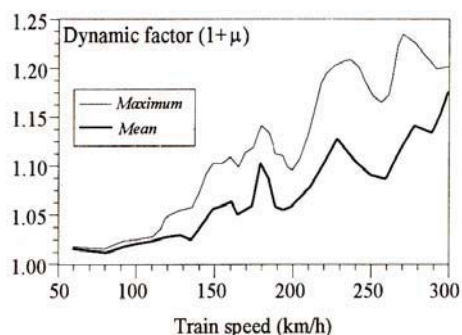
در این سرعتها، واکنش های پل اغلب تشدید می شوند. اوجهای واکنش، زمانی اتفاق می افتند که سرعت قطار v ، فرکانس طبیعی پل f_b به صورت زیر به یکدیگر مرتبط شوند.

$$f_b = \frac{v}{L} \quad (6)$$

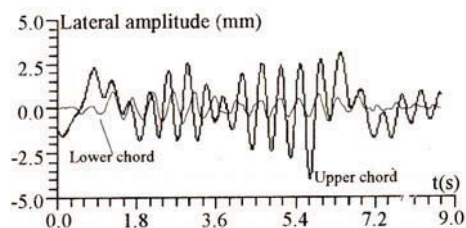
که در آن $\frac{v}{L}$ فرکانس تحریک سیستم بوده و L طول موج حرکت گهواره ای (هانتینگ) برای ارتعاش جانبی یا طول دهانه خرپا برای ارتعاش قائم است، به این معنی که هنگام عبور قطار با سرعت مشخص، فرکانس تحریک به بعضی از فرکانسهای طبیعی سازه نزدیک خواهد بود.

به این ترتیب رزونانس سیستم اتفاق می افتد. در ارتعاشات جانبی، تحریک از طریق حرکت هانتینگ چرخ صورت می گیرد، در حالی که در واکنشهای قائم، تحریک به تغییر مکان تیر طولی خرپا باز می گردد، به طوری که باعث وارد شدن ضربات قائم متناوب بر روی سازه می شود.

این رفتار در جدول ۱ به خوبی نشان داده شده است و در آن سرعت قطار از 120 km/h تا 280 km/h تغییر کرده و واکنش های بیشینه هم در ارتعاشات جانبی یا قائم و هم برای هر دو بررسی شده اند. اکثر فرکانسهای تحریک محاسبه شده از معادله ۶، به مقادیر فرکانسهای طبیعی خرپا بسیار نزدیک هستند [3].

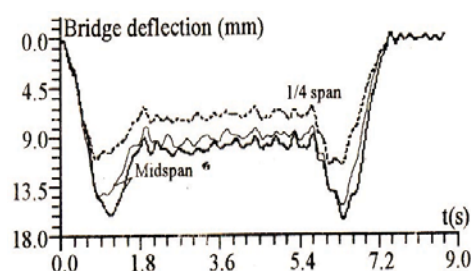


شکل ۷. ضریب دینامیکی بر حسب سرعت قطار

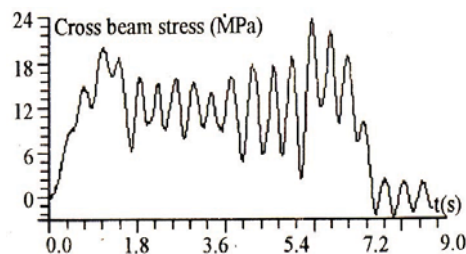


شکل ۴. منحنی های دامنه های تغییر مکان جانبی

شکل ۵ تاریخچه زمانی تغییر مکان دینامیکی خرپا را نشان می دهد. شکل ۶ منحنی تنش محاسبه شده یکی از المانهای خرپا را نشان می دهد.



شکل ۵. منحنی های تغییر مکان دینامیکی



شکل ۶. منحنی تنش تیر عرضی

نتایج نشان می دهند که فازهای اولیه واکنشهای قطار نقش مهمی را در واکنشهای پل ایفا می کنند. برای فهم بهتر تأثیر سرعت قطار در واکنشهای پل، ۳۰ گروه محاسباتی با فازهای اولیه تصادفی با تغییرات سرعت $60 - 300 \text{ km/h}$ صورت گرفته است. مقادیر بیشینه، متوسط و انحراف استاندارد واکنشهای خرپا به وسیله روشهای آماری به دست آمده اند. مقادیر بیشینه از واکنشهای پل در هنگام عبور قطار از روی پل گرفته شده اند.

شکل های ۷ و ۸ توزیع مقادیر بیشینه و متوسط ضریب دینامیکی پل و تغییر مکان جانبی در وسط دهانه خرپا را به صورت تابعی از

جدول ۱. رزونانس سرعت قطار و مودهای ارتعاشی

سرعت قطار (km/h)		۱۲۰	۱۳۰	۱۶۰	۱۷۰	۱۸۰	۲۱۰	۲۳۰	۲۸۰
(Hz)	مود	V	L-V	L-V	L-V	V	L	L-V	L
f_b									
۲/۳۳	L				۲/۳۶				
۴/۰۵	V	۴/۱۶							۳/۸۴
۴/۸۶	V		۴/۵۱						
۵/۱۴	V			۵/۵۵					
۵/۸۱	L-T				۵/۹	۶/۲۵			
۷/۹۲	L-T						۷/۲۹	۷/۹۸	

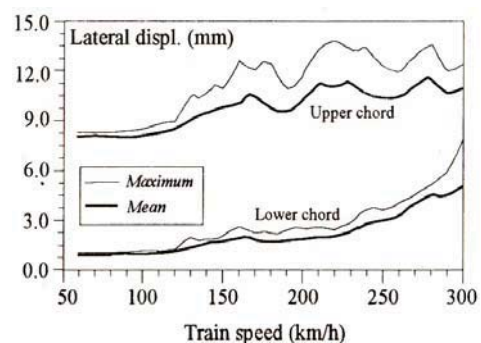
۴- برای پل خرابی دو خطه، ارتعاشات جانبی و قائم در هنگام عبور قطار از یک خط با همدیگر در گیر (مرتبط) می شوند. ارتعاشات پیچشی به وجود آمده از بارگذاری خارج از محور، باعث بزرگتر شدن تغییر مکانهای جانبی و دامنه آنها می شود. به این ترتیب لازم است در تحلیل دینامیکی و طراحی پل راه آهن سریع السیر این موضوع در نظر گرفته شود.

۵- محاسبات نشان داده‌اند که برای خرابی دو خطه نمونه همیشه با افزایش سرعت، واکنش دینامیکی افزایش نمی یابد. تمامی منحنی های واکنشهای بیشینه دارای نقاط اوجی در سرعتهای مشخصی هستند که می توان آنها را رزونانس سرعتهای قطار- پل نامید. به این معنی که هنگام عبور قطار با سرعت مشخص، فرکانس تحریک بسیار نزدیک به بعضی از فرکانسهای طبیعی سازه است.

به این ترتیب رزونانس سیستم در ارتعاشات جانبی، تحریک از طریق حرکت هانتینگ چرخ صورت می گیرد، در حالی که در واکنشهای قائم، تحریک به تغییر مکان تیر طولی خرابا بر می گردد، به طوریکه باعث وارد شدن ضربات قائم متناوب بر روی سازه می گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی بنیاد علوم طبیعی چین (Natural Science Foundation of China) و دانشگاه جیانوتونگ شمالی پکن سپاسگزاری می کنند.



شکل ۸. ضریب دینامیکی برحسب سرعت قطار

در جدول ۱، L نشان دهنده مود جانبی، V مود قائم و T نشان دهنده مود پیچشی است.

۴. نتیجه گیری

- ۱- مدل تحلیلی برای ارتعاش های فضایی سیستم خرابی دو خطه - قطار و روش شبیه سازی رایانه ای به خوبی می تواند ارتعاش های اصلی پل را منعکس نماید.
- ۲- حرکت هانتینگ چرخ و محورهای قطار و تغییرشکل تیر طولی خرابا، نقش مهمی در ارتعاشات سیستم قطار- پل ایفا می کنند. در سرعتهای معینی، فرکانسهای تحریک نزدیک به مقادیر فرکانسهای طبیعی خرابا شده و پدیده رزونانس اتفاق می افتد. در چنین حالتی هم واکنشهای جانبی و هم قائم و یا هر دو تشدید می شوند.
- ۳- تفاوت فازهای اولیه واکنهای قطار تاثیر زیادی در واکنشهای جانبی سیستم خرابا - قطار دارند. چنین موردی نیاز به مطالعات بیشتری دارد.

- 5- Xia, H. , Xu, Y. L., Chan, T. H. T. and Zakeri, J. A.(2000) “Dynamic response of long suspension bridges under running trains”, 5th Annual Congress on Railway Transportation, Tehran, paper No. 2.
- 6- Diana, G. and Cheli, F. (1989) “Dynamic interaction of railway systems with large bridges”, Vehicle System Dynamics, 18, 71-106.
- 7- Xiangrong, G. and Qingyuan Z. (2001), "Track effect analysis on dynamic response of railway vehicle-track-bridge system" International Symposium on Traffic Induced Vibrations and Controls, pp. 275-282.
- 1- Xia, H., Zhang, H. and De Roeck G. (1998) “Dynamic analysis of train - bridge system under random excitations”, In Proceedings of 4th Int. Conf. On Stochastic Struc. Dyn. , Notre Dame, USA, 535-542.
- 2- Fryba, L. (1996) “Dynamics of railway bridges”, Thomas Telford, London, England.
- 3- Xia, H. and Chen, Y. J. (1993) “Dynamic reliability of train-bridge system under wind action by stochastic process extreme analysis”, In Proceedings of EASEC-4, Seoul, Korea, 2063-2068.
- 4- Fafard, M., Mallikarjuna,S. and Savard, M. (1993) “Dynamics of bridge - vehicle interaction”, In Proceedings of EURO DYN'93, Balkema Publisher, Norway, 951-960

Dynamic Analysis of Steel Bridges under Moving Train Loads

J. A. Zakeri, Assistant Professor, Department of Railway Engineering, Iran university of Science and Technology, Tehran, Iran

He Xia, Professor, School of Civil Engineering, Northern Jiaotong, Jiaotong, China.

E-mail: zakeri@iust.ac.ir

ABSTRACT

In this paper, dynamic analytical model of train bridge system is established, with the vehicle wheel hunting as the self excitation of the system. The train bridge system equilibrium equations are derived and computer software for solving the problem is worked out. Whole histories of the train passing through the bridge are simulated on computer. Dynamic responses of the truss and their distributions versus train speeds are calculated and are compared with those from field measurements. Discussions are concentrated on spatial coupling problems occurring in a real double track truss bridge acted on by a train running at speeds of 100 km/h – 300 km/h.

Results of calculations and measurements show that the hunting movement of train wheel sets and the deflection of truss stringer play important roles in the train-truss system vibration. At certain train speeds, the excitation a case either the lateral or the vertical responses of both are amplified. Also, as for a double track truss bridge, the lateral and the vertical vibrations are coupled with each other when a train runs on one track. The torsional vibration induced by eccentric loading makes the lateral displacements and the amplitude greater. This should be taken into account in dynamic analysis and design of high speed railway bridge.

Keywords: Steel bridges, dynamic analysis, train bridges, truss, truss bridges