

## بررسی اندرکنش قطار سریع‌السیر و پلهای دوسر ساده با تیر بتنی پیش‌ساخته

محسن محمدکریمی حسین‌آبادی\*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رضا مرشد، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

E-mail: m.karimi1365@gmail.com

دریافت: ۸۹/۱۰/۰۴ - پذیرش: ۸۹/۱۲/۰۹

### چکیده

واکنش دینامیکی پلهای راه آهن در هنگام عبور قطارهای سریع‌السیر<sup>۱</sup> به پارامترهای متعددی وابسته است. از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار می‌توان به مشخصات دینامیکی پل و قطار، نوع روسازی و سرعت حرکت قطار اشاره کرد. در این مقاله سه پل دهانه ساده با تیر بتنی پیش‌ساخته<sup>۲</sup> به طولهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر که توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور پیشنهاد شده و یک پل پیش‌تنیده<sup>۳</sup> با دهانه ۳۰ متر بر اثر عبور قطار سریع‌السیر در محدوده سرعتی ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر بر ساعت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی پاسخ دینامیکی پلها دو نوع مدل‌سازی از پل و قطار انتخاب شده است: یکی با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار<sup>۴</sup> همراه با روسازی انعطاف‌پذیر (بالاست) و دیگری مدل‌سازی قطار به صورت بارهای متحرک<sup>۵</sup> بدون در نظر گرفتن اثر روسازی است. سرعتهای تشدید<sup>۶</sup> و کاهندگی<sup>۷</sup> و تأثیر تغییرات سختی خمشی در جابجا کردن سرعتهای تشدید و اثر تعداد واگنهای عبوری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد شتاب قائم ایجاد شده در وسط دهانه پلهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متری به دلیل وزن واحد طول کوچک‌تر از پل دهانه ۳۰ متری، بیشتر از پل دهانه ۳۰ متری است. مدل‌سازی قطار به صورت بار در مقایسه با مدل‌سازی با در نظر گرفتن اندرکنش پل و قطار سرعتهای تشدید را قدری بیشتر برآورد می‌کند ولی مقادیر پیش‌بینی شده واکنشهای حداکثر در هنگام تشدید توسط این مدل، در جهت محافظه کارانه بوده است. با گذشت زمان، تغییرات ایجاد شده در سختی و جرم پلها در جهتی است که تشدید در سرعتهای کمتری اتفاق بیفتد. تعداد واگنهای قطار صرفاً در سرعت تشدید اصلی بر پاسخ پل تأثیرگذار است.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش پل و قطار، پدیده تشدید، سرعت تشدید، قطار سریع‌السیر

### ۱. مقدمه

تقسیم‌بندی می‌توان مدل‌سازی وسیله متحرک را به سه دسته مدل بار<sup>۸</sup> [Timoshenko, 1922] و [Fryba, 1972]، مدل جرم<sup>۹</sup> [Foda and Abduljabbar, 1998] و مدل جرم و فنر<sup>۱۰</sup> [Xia and Zhang, 2005] و [Yang and Lin, 1995] تقسیم‌بندی کرد. در مدل‌سازی قطار به صورت بار مقدار نیروی وارده بر پل در هر لحظه ثابت است ولی موقعیت بارها بر روی پل ثابت نیست. با وجود اینکه این نوع مدل‌سازی از وسیله متحرک غیر واقعی است ولی به دست آوردن پاسخهای پل به

تاریخچه تحقیقات بر روی رفتار دینامیکی پل بر اثر عبور وسیله متحرک به حدود یک قرن پیش می‌رسد. بعد از شروع به کار اولین قطار سریع‌السیر در فرانسه با نام TGV و مشاهده شدن شتابی بیش از ۰/۷g در عرشه پل گذرگاه verberie در هفته‌های ابتدایی شروع به کار این قطار سریع‌السیر، مطالعات وسیعی در مورد اندرکنش قطار سریع‌السیر و پل آغاز شد [Delgado (et al.), 2008]. در این تحقیقات عمده تغییرات مدل‌سازی به مدل‌سازی وسیله متحرک مربوط می‌شود. در یک

## ۲. مدل‌سازی اندرکنش پل و قطار

مدل دینامیکی اندرکنش پل و قطار از دو زیر مجموعه قطار و پل تشکیل شده است. این دو سیستم در نقاطی با یکدیگر در تماس هستند. از قطار، چرخها و از پل، ریلها با فرض اینکه در تمام زمان عبور قطار بر روی پل جدایی بین این دو مجموعه اتفاق نیفتد، نقاط اشتراک این دو مجموعه هستند.

### ۲-۱ مدل قطار

در شکل ۱ مدل دو بعدی از قطار سریع‌السیر شینکانسن (SKS) مدل ۳۰۰ نشان داده شده است. هر واگن از قطار به صورت یک جرم صلب بدنه و دو جرم صلب بوژی، که هر کدام از آنها دارای یک درجه آزادی قائم و یک درجه دورانی حول محور عمود بر صفحه هستند و چهار چرخ که هم به صورت جرمهای متمرکزی که فقط دارای درجه آزادی قائم هستند، در نظر گرفته شده است. با این اوصاف هر واگن از قطار سریع‌السیر شینکانسن (SKS) مدل ۳۰۰ در حالت مدل‌سازی دو بعدی دارای ده درجه آزادی است. مشخصات یگ واگن از قطار سریع‌السیر شینکانسن (SKS) سری ۳۰۰ در جدول ۱ ارائه شده است. معادله مرتبه دو دیفرانسیل حاکم بر قطار به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$M_v \ddot{V}_v + C_v \dot{V}_v + K_v V_v = P_v \quad (1)$$

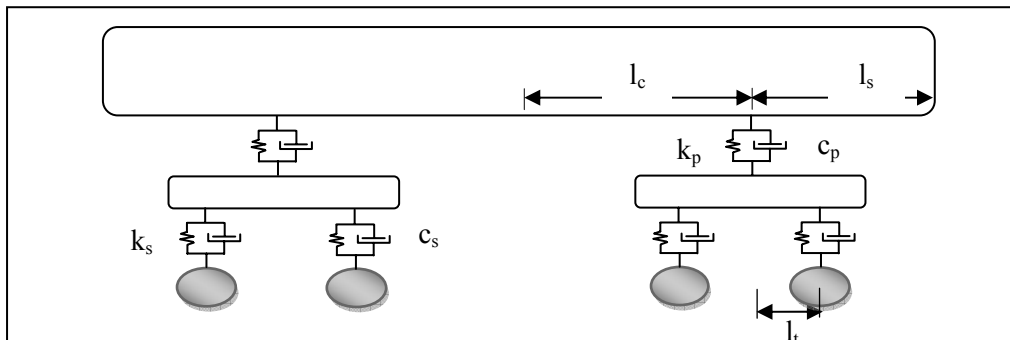
که در این رابطه  $M_v$ ،  $C_v$  و  $K_v$  به ترتیب مقدار ماتریس جرم، میرایی و سختی وسیله متحرک و  $\dot{V}_v$ ،  $\ddot{V}_v$  و  $V_v$  به ترتیب بردار شتاب، سرعت و جابجایی درجات آزادی قطار و  $P_v$  بردار نیروهای وارده بر قطار هستند.

### ۲-۲ مدل پل

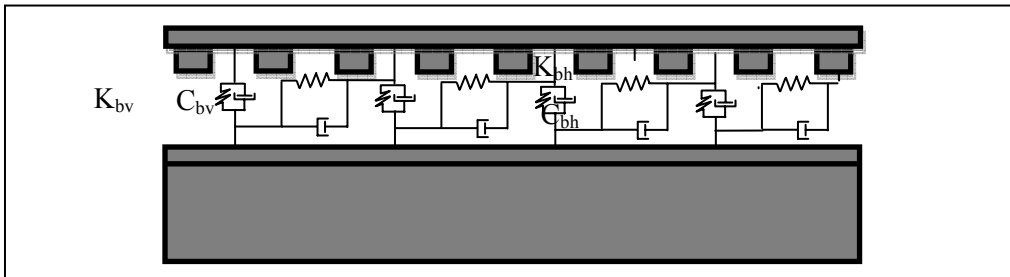
در شکل ۲ نمایی از مدل دو بعدی یک المان از پل و روسازی نشان داده شده است. از مدل تیر برنولی-اولر برای مدل‌سازی ریل و عرشه استفاده شده و برای مدل‌سازی بالاست از سیستم فنر-میراگر که به صورت گسترده در دو جهت قائم و افقی بین ریل و پل قرار دارند، استفاده شده است. در شکل ۳ نمایی از کل سیستم پل نشان داده شده است که ریل در هر دو امتداد پل به صورت تیر با طول نامحدود بر روی بستر الاستیک قرار گرفته است.

صورت حل بسته<sup>۱۱</sup>، بررسی پارامترهای تأثیرگذار را بسیار ساده‌تر می‌سازد. ساده‌ترین مدلی که می‌توان اثر اندرکنش وسیله نقلیه را در نظر گرفت مدل‌سازی وسیله نقلیه به صورت جرم متحرک است. در این حالت مقدار نیروی تماسی در هنگام عبور وسیله نقلیه ثابت نیست ولی این نوع مدل‌سازی از وسیله متحرک هم قادر به ارزیابی راحتی مسافری نیست. کامل‌ترین مدل از وسیله متحرک مدل جرم سوار بر فنر است که این مدل‌سازی از دهه ۱۹۷۰ تاکنون روند تکاملی خود را طی کرده و امروزه مدل‌های کامل سه بعدی از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند، که شامل بدنه اصلی وسیله نقلیه، بوژی و سیستم چرخهاست و این قسمتها توسط المانهای سختی و میرایی به یکدیگر متصل شده‌اند.

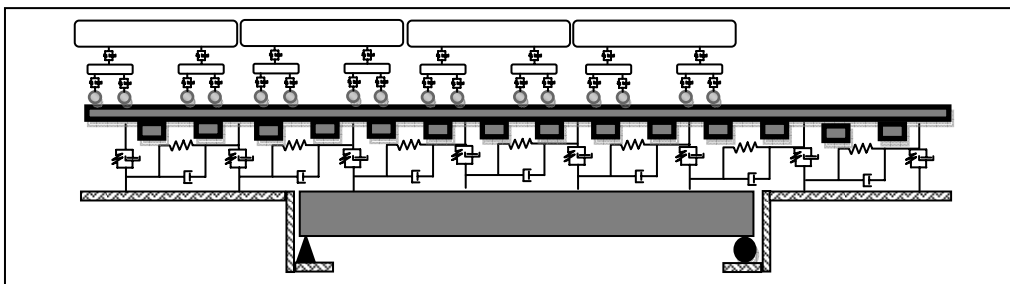
همان‌طور که اشاره شد پاسخ دینامیکی پلهای مسیر ریلی وابسته به پارامترهای گوناگونی است. بنابراین تعریف عبارتی که تمام این پارامترها را شامل شود و بتواند مقادیر پاسخ استاتیکی پل را به مقادیر پاسخ دینامیکی پل تبدیل کند، امری دور از دسترس است، بویژه اینکه در حرکت قطار سریع‌السیر بر روی پل، سرعتهای تشدید و کاهندگی وجود دارد که باعث تغییرات ناگهانی در مقادیر پاسخ پل می‌شود. با انجام تحلیل دینامیکی برای پلهای متفاوت و بررسی مقادیر پاسخهای آنها تحت عبور قطارهایی که در آینده در این خطوط سرویس‌دهی خواهند کرد، شناخت کاملی از پاسخ دینامیکی پلهای گوناگون به دست می‌آید که می‌تواند منجر به انتخاب مناسبی از نوع سیستم پل، برای احداث پلهای جدید در مسیرهای ریلی با سرعت بالا شود که بیشتر شدن عمر بهره‌برداری و اقتصادی شدن پل را در بر خواهد داشت. در این مقاله پلهای بتنی با تیر پیش ساخته که توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور [سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی نشریه ۲۹۵-۱۳۸۶] پیشنهاد شده، تحت عبور قطار سریع‌السیر شینکانسن (SKS) مدل ۳۰۰ [Yang (et al.), 2004] مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه تحقیقات صورت گرفته نشان‌دهنده این است که اعوجاج در مسیر ریلی و مدل‌سازی سه بعدی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی پاسخ دینامیکی پلهای مستقیم ندارد [Majka and Hartnett, 2009] و تنها در ارزیابی راحتی سرنشینان و پایداری حرکت قطار سریع‌السیر نقش دارد [ذاکری، ۱۳۸۴]. از این رو در این مقاله از اثر اعوجاج صرف‌نظر شده و از مدل‌سازی دو بعدی برای مدل‌سازی قطار و پل استفاده شده است.



شکل ۱. مدل دوبعدی از واگن قطار



شکل ۲. مدلسازی المان ریل و پل



شکل ۳. مدل حرکت قطار بر روی پل با روسازی انعطاف‌پذیر

جدول ۱. مشخصات قطار سریع‌السیر شینکانسن (SKS) مدل ۳۰۰ [Yang (et al.), 2004]

مقدار	نماد	قسمت
۴۱/۷۵t	$M_c$	جرم بدنه
$۲۰۸۰t \cdot m^2$	$I_c$	ممان اینرسی جرمی بدنه
۳/۰۴t	$M_t$	جرم یک بوژی
$۳/۹۳t \cdot m^2$	$I_t$	ممان اینرسی جرمی یک بوژی
۱/۷۸t	$M_w$	جرم یک چرخ
۸/۷۵m	$l_c$	نصف فاصله طولی بین مرکز جرمهای بوژی عقب و جلو
۱/۲۵m	$l_t$	نصف فاصله طولی بین چرخها در یک بوژی
۳/۷۵m	$l_s$	فاصله طولی بین مرکز جرم بوژی و نزدیکترین بدنه خارجی واگن
۱۱۸۰kN/m	$k_p$	سختی سیستم معلق اولیه
۳۹/۲kN-s/m	$c_p$	میرایی سیستم معلق اولیه
۵۳۰kN/m	$k_s$	سختی سیستم معلق ثانویه
۹۰/۲kN-s/m	$c_s$	میرایی سیستم معلق ثانویه

جدول ۲. مشخصات ریل و زیرسازی [Yang (et al.), 2004]

مقدار	نماد	قسمت
۲۱۰ GPa	$E_r$	ضریب یانگ ریل
۰/۵۸۷ ton/m	$m_r$	جرم واحد طول دو ریل با احتساب وزن تراورس
$۶/۱۲ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^4$	$I_r$	ممان اینرسی دو ریل
$۱۰۴ \times ۱۰^۳ \text{ kN/m}$	$k_{bv}$	سختی قائم واحد طول لایه بالاست
۵۰ kN-s/m	$C_{bv}$	میرایی قائم واحد طول لایه بالاست
$۱۰۴ \times ۱۰^۲ \text{ kN/m}$	$k_{bh}$	سختی افقی واحد طول لایه بالاست
۵۰ kN-s/m	$C_{bh}$	میرایی افقی واحد طول لایه بالاست

تکرار [Majka, 2006] است که در ادامه به طور مختصر این دو روش توضیح داده شده و مزایای هر کدام بیان خواهد شد.

### ۳-۱ حل مسئله اندرکنش پل و وسیله متحرک با استفاده از روش نیروی تماسی

در این روش ابتدا وسیله متحرک به دو بخش تقسیم می‌شود، یکی قسمت در تماس با پل و قسمت دیگر که در تماس مستقیم با پل نیست. با این تعریف عبارت  $P_v$  در معادله (۱) هم به دو قسمت تقسیم می‌شود که یکی نیروهای خارجی که شامل وزن اجزا می‌شود و دیگری نیروهای تماسی که این نیروها در بردار  $P_b$  در معادله دیفرانسیل (۲) هم وجود دارد. با استفاده از روابط نیومارک دسته معادله دیفرانسیل درجه دوی (۱) به صورت دسته‌ای از معادلات هم عرض تقسیم می‌شود.

اگر از شکلی از روابط نیومارک [Newmark, 1959] استفاده شود که فقط جابجایی لحظه  $t+\Delta t$  باقی بماند، در لحظه  $t+\Delta t$  فقط مقادیر نیروی تماسی و جابجایی قسمت بالا و جابجایی قسمت در تماس با پل باقی خواهد ماند. مقدار جابجایی قسمت بالای وسیله متحرک در لحظه  $t+\Delta t$  از دسته معادله هم‌ارز که از رابطه (۱) با روش نیومارک به دست آمده بود، حذف شده و مقدار نیروهای تماسی در لحظه  $t+\Delta t$  براساس جابجایی قسمت در تماس با پل به دست می‌آید. مقادیر نیروهای تماسی به دست آمده در دسته معادله دیفرانسیل درجه دوم (۲) قرار داده شده و سپس با استفاده از روش نیومارک این معادله دیفرانسیل حل می‌شود.

مشخصات پارامترهای اجزای تشکیل دهنده روسازی که شامل المان ریل و بالاست هستند در جدول ۲ ارائه شده است.

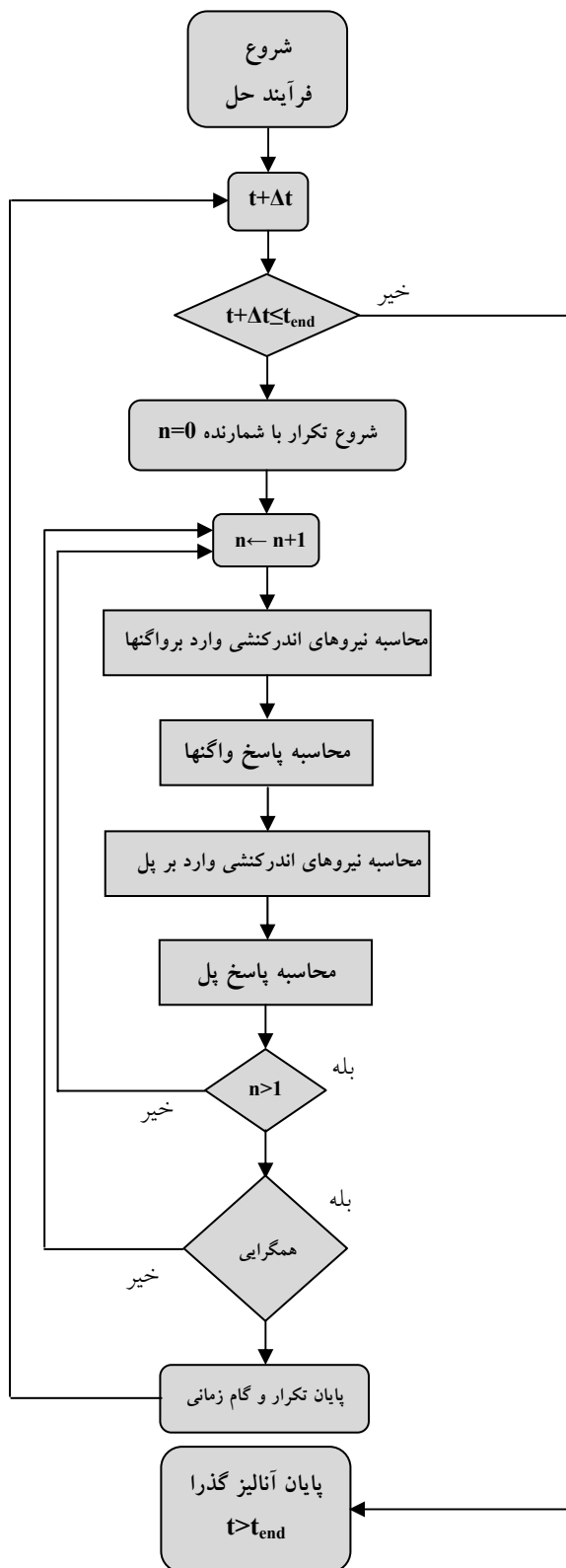
معادله مرتبه دو دیفرانسیل حاکم بر سیستم پل و روسازی بدون در نظر گرفتن اثر عبور قطار به صورت رابطه (۲) است.

$$M_b \ddot{V}_b + C_b \dot{V}_b + K_b V_b = P_b \quad (2)$$

در این رابطه  $M_b$ ،  $C_b$  و  $K_b$  به ترتیب مقدار ماتریس جرم، میرایی و سختی کل مجموعه پل و روسازی و  $V_b$ ،  $\dot{V}_b$  و  $\ddot{V}_b$  به ترتیب بردار شتاب، سرعت و جابجایی درجات آزادی کل مجموعه پل و روسازی هستند و  $P_b$  بردار بار وارد بر گره‌های این مجموعه است.

### ۳. روش‌های حل مسئله اندرکنش پل و وسیله متحرک

مسئله اندرکنش حرکت وسیله متحرک بر روی پل از دو زیر مجموعه پل و وسیله متحرک تشکیل شده است. رابطه حاکم بر هر دو جزء از این مجموعه یک معادله دیفرانسیل درجه دو به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) است. این دو دسته معادله با فرض اینکه در حین عبور جدایی بین چرخها و ریل اتفاق نیفتد در یک سری نقاط با یکدیگر مشترک هستند و در این نقاط در حال تبادل نیرو بین یکدیگر هستند. با توجه به اینکه قطار در حال حرکت است و این نقاط در حال جابجا شدن هستند ماتریسهای حل مسئله وابسته به زمان هستند. دو روش عمده برای حل این مسئله استفاده می‌شود. روش تئوری که یک نمونه از آن روش نیروی تماسی [Yang (et al.), 2004] است و دیگری روش



شکل ۴. فلوچارت حل مسئله اندرکنش وسیله متحرک و پل به روش تکرار

المانهای پل هم به دو قسمت تقسیم می‌شوند که یکی المانهایی هستند که چرخها در تماس با آنها هستند که فرآیند توضیح داده شده در بالا بر روی این دسته از المانها صورت می‌گیرد و دیگر المانهایی از پل که چرخي از وسیله متحرک در تماس با آنها نیست و به صورت المانهای پل باقی خواهند ماند. در این روش ماتریسهای به دست آمده جرم، میرایی و سختی پل را در هر گام از حل با تعویض المانهایی که باید اندرکنش وسیله متحرک در آنها در نظر گرفته شود، اصلاح شده و با شرایط آغازین گام قبل با استفاده از روش نیومارک معادله دیفرانسیل حل می‌شود. با این طریق فرمول بندی تعداد درجات آزادی سیستم برابر درجات آزادی پل است و در تمام گامهای حل یکسان است. با ثابت باقی ماندن درجات آزادی سیستم، ماتریس حاصله متقارن خواهد بود. توضیحات جامع‌تر در مرجع [Yang (et al.), 2004] آورده شده است.

### ۲-۳ حل مسئله اندرکنش پل و وسیله متحرک با استفاده از روش تکرار

همان‌طور که اشاره شد مسئله اندرکنش وسیله متحرک و پل از دو قسمت تشکیل شده است که تنها در نقاطی در تماس با یکدیگر هستند. در این روش ابتدا نیروهای وارده بر سیستم وسیله متحرک به صورت تحریک پایه به چرخهای وسیله متحرک وارد می‌شود و سپس واکنش وسیله متحرک بر اثر این تحریک محاسبه می‌شود و مقدار نیروی وارده بر نقطه تماس چرخها با سطح به دست می‌آید. نیروی به دست آورده بر نقاط تماسی چرخها بر روی پل قرار گرفته و بعد از حل معادله دیفرانسیل (۲) حاکمه بر پل مقدار شتاب، سرعت و جابجایی نقاط تماسی به دست می‌آید و مجدداً به صورت تحریک پایه به چرخهای وسیله نقلیه وارد می‌شود و این فرآیند تکرار می‌شود تا اینکه معیار همگرایی تعریف شده ارضا شود. معیار همگرایی را می‌توان به اختلاف نیروها و یا شتابهای نقاط تماسی در دو فرآیند متوالی تکرار بخش بر مجموع نیروهای وارده بر پل در هر گام زمانی نسبت داد.

در شکل ۴ فرآیند حل توضیح داده شده در بالا که به صورت فلوچارت از مرجع [Majka, and Hartnett, 2009] استخراج شده، نشان داده شده است.

برای سایر مشخصات شامل جابجایی قائم وسط پل، جابجایی و شتاب قائم وسط دهانه ریل و شتاب قائم و دورانی بدنه واگن نیز انجام شده و در تمام موارد تطابق بسیار خوبی بین دو روش مشاهده گردیده که برای اختصار آورده نشده است.

#### ۴. مشخصات پلهای مورد بررسی

پلهای انتخاب شده از نشریه ۲۹۵ که مجموعه‌ای از نقشه‌های همسان پلها و عرشه پلهای راه آهن دهانه ۱۰ تا ۲۵ متری است، از نوع تیر بتنی پیش ساخته و در ۳ دهانه مختلف هستند که مطابق آیین نامه بارگذاری پلها و برای باری تقریباً دو برابر بار اعمالی از واگن قطار شینکانسن (SKS) سری ۳۰۰ در حالت استاتیکی طراحی شده‌اند. همچنین یک پل پیش تنیده بتنی با دهانه ۳۰ متر [Yang (et al.), 2004] برای کنترل صحت محاسبات انتخاب شده است و از سوی دیگر این پل در بین پلهای مورد بررسی تنها پلی است که دارای سرعت تشدید اول خود در محدوده سرعت مورد بررسی است. تمام پلهای در نظر گرفته شده دارای سطح مقطع یکسان و مشخصات یکسانی در طول خود هستند. میرایی برای تمام پلها برابر با ۲/۵٪ در نظر گرفته شده است. مشخصات مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی پلها در جدول ۳ آورده شده است.

#### ۵. اثر تعداد واگن عبوری بر روی واکنشهای پل

در بررسی حرکت قطار بر روی پل اگرچه نوع قطاری که در مسیر ارایه خدمت خواهد کرد می‌تواند قابل پیش بینی باشد، پیش بینی تعداد واگنهای قطار امری غیر ممکن است و اینکه چه تعداد واگن باید در نظر گرفته شود که بیشترین پاسخها در پل ایجاد شود تنها با مقایسه پاسخ دینامیکی پل بر اثر عبور قطار با تعداد واگنهای مختلف به دست خواهد آمد. از این رو دو پل با دهانه ۱۰ و ۳۰ متر در محدوده سرعت ۱۰۰ تا ۴۵۰ کیلومتر بر ساعت در حالی که قطار شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ واگن است بررسی شده است. انتخاب این دو پل از این جهت بوده است که بین پلهای در حال بررسی پل دهانه ۱۰ متری سبک ترین پل و پل با دهانه ۳۰ متر تنها پلی است که در محدوده سرعت بررسی شده اولین فرکانس حرکت متوالی چرخهای قطار با فرکانس

#### ۳-۳ مقایسه دو روش حل برای حل اندرکنش وسیله

##### متحرک و پل

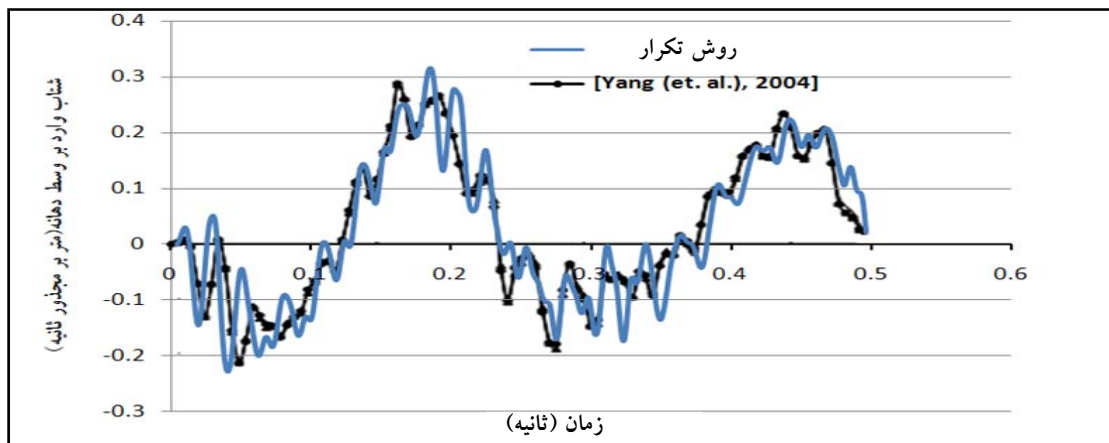
در روش نیروی تماسی در هر گام برای در نظر گرفتن اندرکنش وسیله متحرک و پل ماتریسی به دست آمده و معکوس می‌شود ولی در روش تکرار بعد از یک بار معکوس کردن ماتریس پل و وسیله متحرک دیگر نیازی به به دست آوردن ماتریس جدید نیست و فقط در هر گام باید تکرار صورت گیرد تا معیار همگرایی ارضا شود. البته باید به این نکته نیز اشاره شود که در روش تکرار با وجود اینکه ماتریسی در هر گام نباید معکوس شود، اگر تغییرات نیروی تماسی در گامهای متوالی زیاد باشد فرآیند همگرایی کند خواهد شد.

بزرگترین مزیت روش تکرار نسبت به روش نیروی تماسی در این است که اگر دو زیر برنامه، یکی برای تحلیل پل موجود باشد که ورودی آن نیرو در نقاط دلخواه و خروجی آن شتاب، سرعت و جابجایی در آن نقاط باشد، و دیگری زیر برنامه‌ای برای آنالیز وسیله متحرک، که ورودی آن تحریک تکیه گاهی در چرخها و خروجی مقدار عکس العمل نیروی تکیه گاهی وارد باشد که بر چرخها وارد باشد، با یک برنامه ساده که بتواند این دو برنامه را برای حل هدایت کند، می‌توان مسئله اندرکنش وسیله متحرک و پل را حل کرد. همین برتری روش تکرار استفاده از المانهای حجمی را برای پل با استفاده از نرم افزارهای موجود میسر ساخته است [Liu, 2009]، [Ronagh and Moghimi, 2008]. در این مقاله از روش تکرار برای حل مسئله اندرکنش پل و قطار استفاده شده است و برای حل هر کدام از معادلات دیفرانسیل پل و قطار از روش نیومارک [Newmark, 1959] با فرض شتاب متوسط ( $\gamma=0.5$ ،  $\beta=0.25$ ) استفاده شده است.

معیار همگرایی که به صورت تفاوت نیروهای وارده به پل در دو فرآیند متوالی تکرار بخش بر مجموع نیروهای وارده بر پل در هر گام زمانی است، برابر با  $1/1000001$  در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که برای صحت سنجی برنامه نوشته شده توسط مؤلفین از کارهای صورت گرفته در مرجع [Yang (et al.), 2004] استفاده شده است. در شکل ۵ شتاب قائم وسط دهانه پل دهانه ۳۰ متری که مشخصات آن در بخش ۴ آورده شده است، بر اثر عبور یک واگن از قطار شینکانسن با مرجع فوق که از روش نیروی تماسی استفاده کرده، مقایسه شده است. این مقایسه

تعداد واگنها تأثیری بر روی شتاب وارد بر عرشه ندارد (اولین سرعت تشدید پل دهانه ۱۰ متری ۱۲۶۶ کیلومتر بر ساعت است). از طرفی در پل دهانه ۳۰ متری در سرعت تشدید تفاوتی در شتاب ایجاد شده در پل برای تعداد واگنهای بیشتر از ۱۰ دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده این است که میرایی در سیستم پل دیگر اجازه تولید شتاب بیشتری در وسط دهانه با گذر بیش از ۱۰ واگن را نمی‌دهد.

اصلی این پل برابر می‌شود (توضیح بیشتر در مورد سرعت‌های تشدید در بخش ۶ آورده شده است). همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است عمده تفاوت در شتاب ایجاد شده در وسط دهانه بر اثر عبور تعداد واگنهای مختلف در محدوده سرعت ۳۶۰ کیلومتر بر ساعت، که اولین سرعت تشدید پل دهانه ۳۰ متری است، اتفاق افتاده است. شتاب ایجاد شده در وسط دهانه پل ۱۰ متری در تمام سرعتها بزرگتر از پل دهانه ۳۰ متری است، ولی

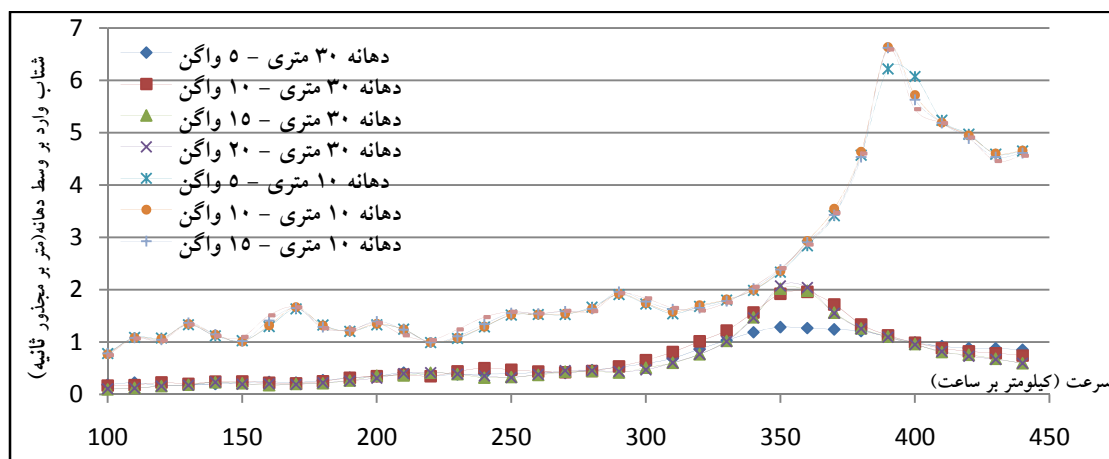


شکل ۵. مقایسه روش تکرار (برنامه تدوین شده) و روش نیروی تماسی برای به دست آوردن شتاب وارد بر وسط پل با دهانه ۳۰

جدول ۳. مشخصات پلهای مورد بررسی در تحقیق

اولین فرکانس (HZ)	مدول الاستیسیته (GPa)	جرم واحد طول* (ton/m)	ممان اینرسی (I) m <sup>4</sup>	دهانه محاسباتی (m)	دهانه خالص (m)
۱۴/۰۶	۲۷/۳۹**	۹/۹	۰/۳۸	۱۰/۷	۱۰
۸/۸۴	۲۷/۳۹	۱۰/۷	۰/۷۹	۱۵/۹	۱۵
۶/۸۱	۲۷/۳۹	۱۱/۷	۱/۵۶	۲۱	۲۰
۴/۰۲	۲۸/۲۵	۴۱/۷۴	۷/۸۳۹	۳۰	۳۰

\*وزن واحد طول پلها بدون احتساب وزن تراورس و ریل      \*\*مدول الاستیسیته با احتساب بتن با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال



شکل ۶. شتاب وارد بر وسط دهانه بر اثر عبور تعداد واگنهای مختلف

## ۶. سرعت‌های تشدید و کاهندگی

بیشتر شدن واکنش پل بر اثر عبور قطار امری آشکار است، ولی در سرعت‌های خاصی واکنشها به صورت چشمگیری افزایش و یا حتی کاهش می‌یابند. زمانی که فرکانس اصلی پل با یکی از فرکانسهای حرکت بارهای متوالی بر قطار یکسان شود باعث ایجاد پدیده تشدید می‌شود. این پدیده را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان کرد [EN1991:2, 2003].

$$v_i = n_0 \lambda_i \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $v_i$ ،  $i$  امین سرعت تشدید،  $n_0$  فرکانس اصلی پل زمانی که هیچ جرمی بر روی آن نباشد،  $\lambda_i = d/i$  و  $d$  برابر با فاصله چرخهای متناظر در دو واگن متوالی است ( $i$  می‌تواند اعداد صحیح مساوی و بزرگ‌تر از ۱ باشد). در جدول ۴ پنج سرعت تشدید برای پلهای مورد بررسی که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده، نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در محدوده سرعت بررسی، پل با دهانه ۱۰ متر سرعت‌های تشدید سوم، چهارم و بیشتر و پلهای ۱۵ و ۲۰ متر سرعت‌های تشدید دوم، سوم و بیشتر و پل با دهانه ۳۰ متر اولین سرعت تشدید و سرعت‌های تشدید بعدی را تجربه می‌کنند.

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مقدار شتاب وارد بر عرشه پل و مقدار ضریب ضربه<sup>۱۳</sup> جابجایی وسط دهانه تیر با حرکت ۱۰ واگن از قطار در سرعت‌های مختلف و در دو حالت حرکت قطار به صورت بار و حرکت قطار با در نظر گرفتن اثر اندرکنش قطار و پل رسم شده است. ضریب ضربه بر اساس مقادیر بیشینه پاسخهای دینامیکی  $R_{dyn}$  و استاتیکی  $R_{st}$  طبق رابطه (۴) به دست می‌آید که در این رابطه مقدار بیشینه جابجایی استاتیکی از عبور قطار مورد بررسی با سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت به دست آورده شده است.

$$I = \frac{R_{dyn} - R_s}{R_s} \quad (4)$$

هریک از نمودارهای رسم شده در شکل‌های ۷ و ۸ برای پلهای مختلف دارای تعداد زیادی نقاط بیشینه و کمینه محلی هستند که هر یک از نقاط بیشینه نسبتی مربوط به سرعت‌های تشدید و هر کدام از کمینه‌های نسبتی، مربوط به سرعت‌های کاهندگی هستند. با بزرگ‌تر شدن دهانه پل سرعت تشدید پیش‌بینی شده برای مدل بار توسط رابطه (۳) دقیق‌تر است و این به این دلیل است که رابطه (۳) با فرض متمرکز بودن بار چرخهای بوژی در مرکز

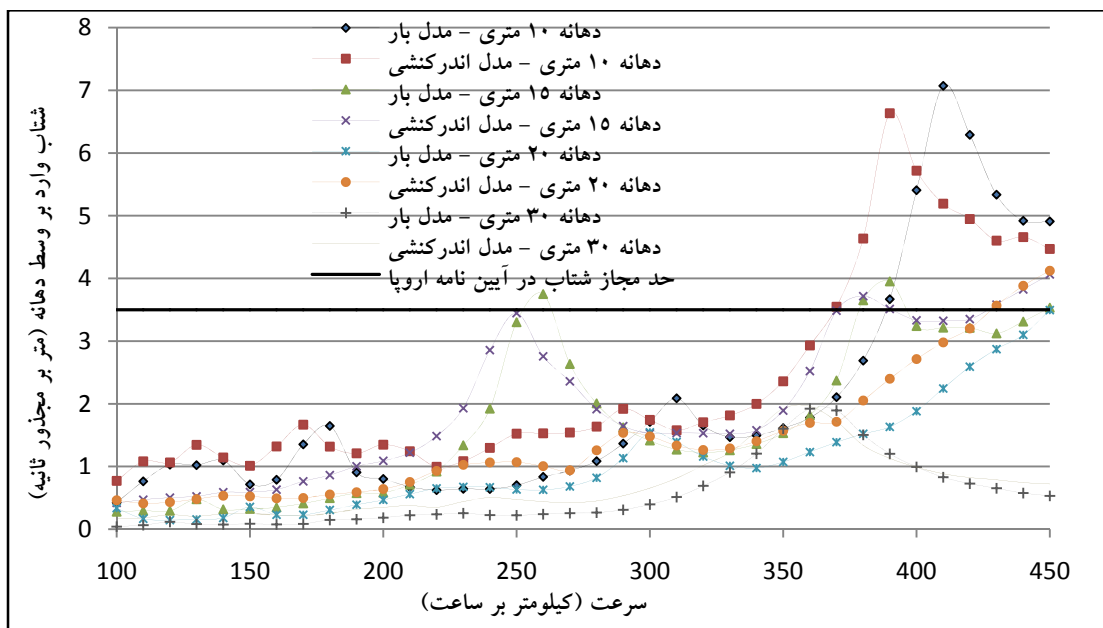
بوژی به دست آمده است. با بزرگ‌تر شدن دهانه، فاصله چرخها در بوژی در مقایسه با دهانه پل کوچک‌تر شده و فرض معادل گرفتن بار دو چرخ در یک بوژی در میانه بوژی برای به دست آوردن رابطه (۳) دقیق‌تر است. رسم توأم نمودارهای مدل بار و مدل اندرکنش در شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که در مدلسازی با در نظر گرفتن اندرکنش وسیله متحرک و پل، تشدید در سرعت‌های کمتری نسبت به مدل حرکت بار از قطار اتفاق افتاده است و هر چه دهانه پل کوچک‌تر شود و یا به عبارت دیگر هر چقدر جرم وسیله نقلیه در مقایسه با پل بزرگ‌تر باشد این اختلاف بیشتر می‌شود. این مسئله می‌تواند موجب شود که اگر سرعت طراحی نزدیک به سرعت تشدید باشد مدل بار نتواند پاسخ پل را به درستی برآورد نماید. به طور مثال در دهانه ۱۰ متری تشدید در حالت مدل بار و مدل اندرکنشی از وسیله نقلیه به ترتیب در سرعت‌های ۴۱۰ و ۳۹۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق افتاده است. اگر سرعت طرح قطار ۳۹۰ کیلومتر بر ساعت باشد و طراحی تا این سرعت و با مدل قطار به صورت بارهای متوالی صورت گیرد، جوابهای حاصله در خلاف جهت اطمینان هستند. از این رو اگر در طراحی از مدل بار برای ارزیابی پاسخ دینامیکی پل استفاده می‌شود باید سرعت طراحی مقداری بیشتر از سرعت طرح در نظر گرفته شود. آیین‌نامه اروپا افزایش ۲۰ درصدی در سرعت طرح برای طراحی را ضروری می‌داند [EN1991:2, 2003].

بر اساس آیین‌نامه اروپا [EN1991:2, 2003] مقدار شتاب ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه حد مجاز شتاب وارد بر پل با روسازی بی‌بالاست دار است (در شکل ۷ به صورت خط ممتد مشخص شده است). با توجه به شکل ۷ در پل دهانه ۱۵ متر در سرعت تشدید دوم و سوم و در دهانه ۱۰ متر در سرعت تشدید سوم، شتاب از مقدار شتاب مجاز آیین‌نامه اروپا بیشتر است که نشان‌دهنده این است که با وجود اینکه در دهانه‌های کوچک احتمال اتفاق افتادن اولین سرعت تشدید در سرعت‌های امروزی قطارهای سریع‌السیر وجود ندارد، سرعت‌های تشدید دوم و سوم هم قادر به ایجاد پاسخهای بزرگی در پل هستند. ضمناً بررسی شکل‌های ۷ و ۸ نشان دهنده این است که سرعت‌های تشدید چهارم به بعد برای هیچ‌یک از پلهای قادر به ایجاد بیشینه پاسخ قابل توجه در وسط دهانه پل نیستند. آیین‌نامه اروپا هم کنترل سرعت‌های تشدید چهارم به بعد را ضروری نمی‌داند و حداکثر مقدار پارامتر  $i$  در رابطه (۳) را عدد ۴ در نظر گرفته است.

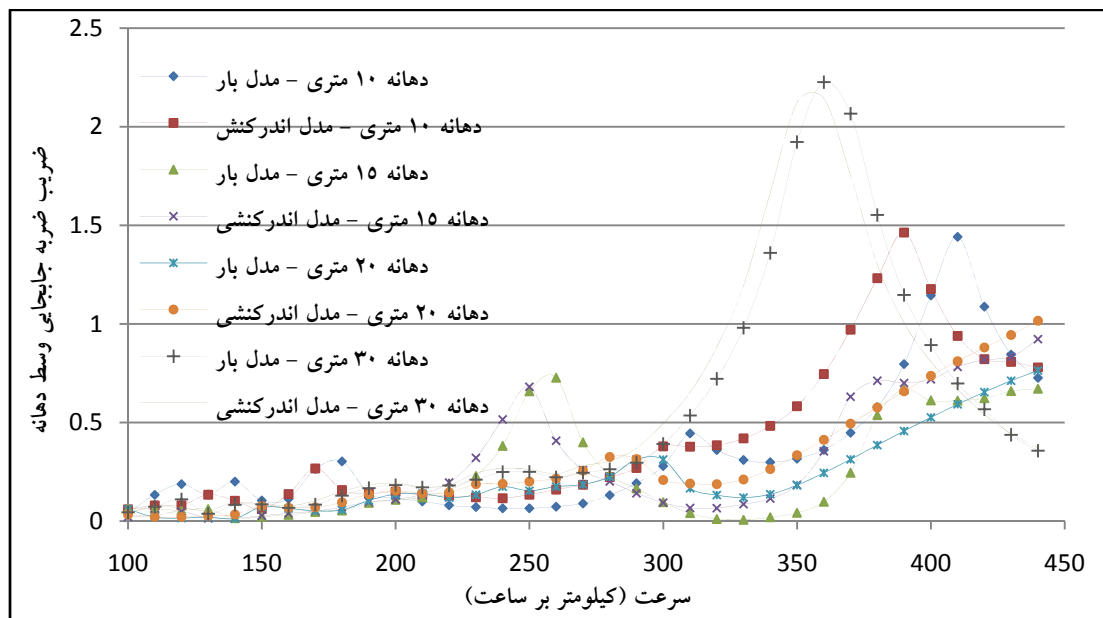


جدول ۴. مقایسه سرعت تشدید پلهای مورد بررسی

$v_5$ (km/h)	$v_4$ (km/h)	$v_3$ (km/h)	$v_2$ (km/h)	$v_1$ (km/h)	دهانه خالص پل (m)
۲۵۳	۳۱۶	۴۲۳	۶۳۳	۱۲۶۶	۱۰
۱۵۹	۱۹۹	۲۶۵	۳۹۸	۷۹۵	۱۵
۱۲۳	۱۵۳	۲۰۴	۳۰۶	۶۱۳	۲۰
۷۲	۹۰	۱۲۰	۱۸۱	۳۶۱	۳۰



شکل ۷. شتاب وارد بر وسط دهانه



شکل ۸. ضربه جانبی وسط دهانه

## ۷. تغییرات سختی و جرم در واکنش پل

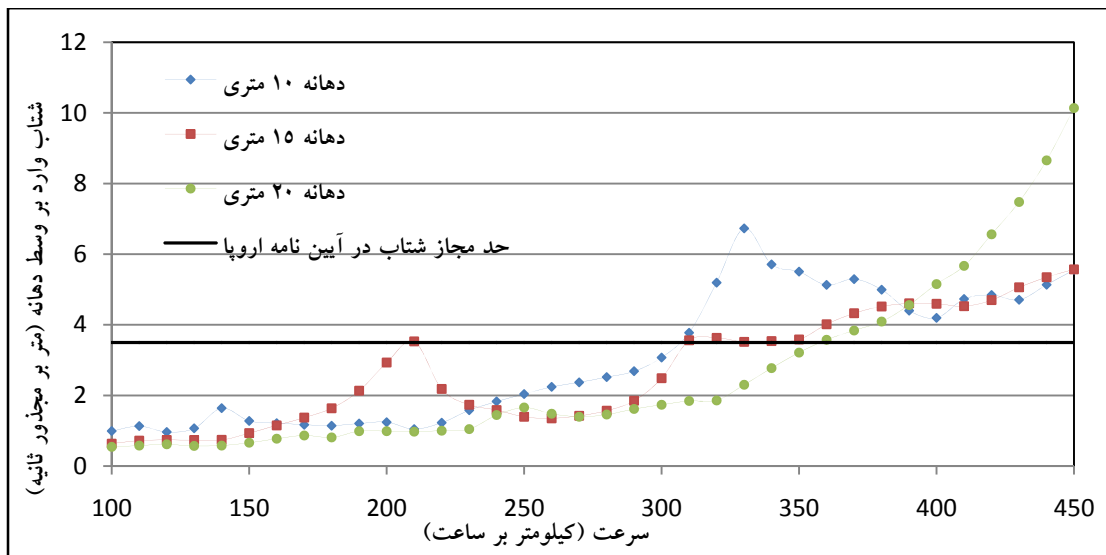
مقادیر ارائه شده در جدول ۴ مشخصات پلها در روزهای اول بهره‌برداری آنهاست. ولی در طول عمر هر سازه‌ای تغییراتی در مشخصات آن اتفاق می‌افتد. عموماً با توجه به عملیاتی که برای نگهداری خطوط صورت می‌گیرد جرم پلها افزایش پیدا می‌کند و از طرف دیگر با گذشت زمان، از سختی سازه هم کاسته می‌شود. هر دوی این تغییرات در جهت کاهش مقدار فرکانس سازه هستند و کاهش مقدار فرکانس سازه طبق رابطه (۳) باعث می‌شود که سرعتهای تشدید در سرعتهای کمتری نسبت به روزهای اول بهره‌برداری پل اتفاق بیفتد.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر شتاب و ضریب تشدید جابجایی وسط دهانه در شرایطی که پلها بدون تغییر جرم، ۳۰ درصد از سختی خمشی خود را از دست داده باشند رسم شده است (برای مقدار حداکثر جابجایی استاتیکی در رابطه (۴) از حرکت قطار با سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت در شرایطی که پلها دارای سختی خمشی برابر با ۰/۷ سختی خمشی در جدول ۳ باشند، استفاده شده است).

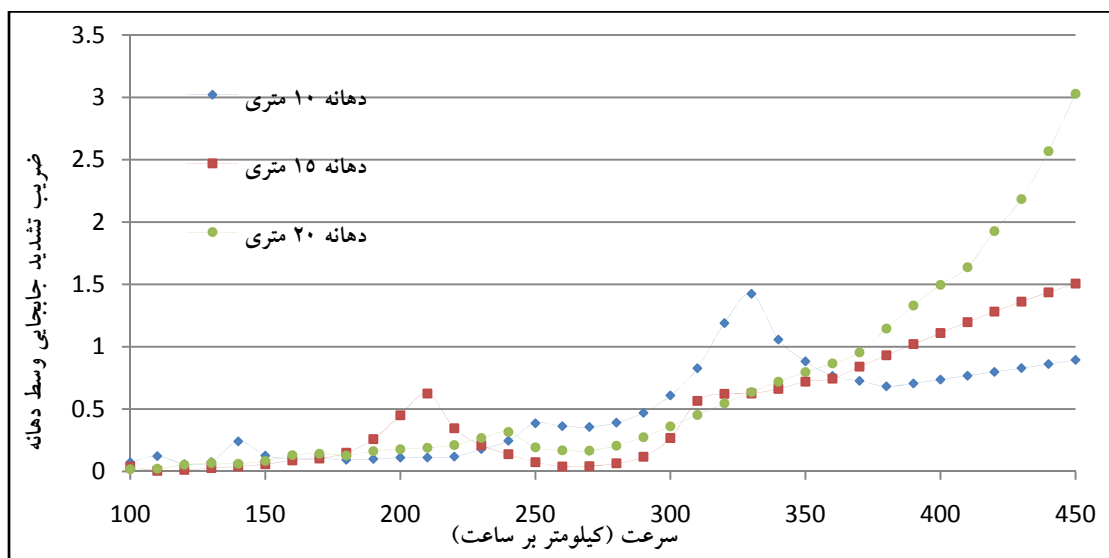
همان‌طور که در اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود از دست دادن سختی در پل باعث شده است تشدید در سرعتهای کمتری برابر با  $0.7^{1/5}$  برابر سرعتهای تشدید حالت قبل اتفاق بیفتد. اتفاق افتادن سرعتهای تشدید در سرعتهای کمتر در شرایطی که سرعت عبور قطار ثابت باشد باعث افزایش پاسخ پل شده و افزایش پاسخ در پل باز موجب از دست رفتن سختی پل می‌شود و این روند ادامه پیدا می‌کند تا اینکه پل قابلیت بهره‌برداری خود را از دست می‌دهد.

## ۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق پلهای با دهانه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر که به‌صورت تیر پیش‌ساخته هستند و از طرف سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی پیشنهاد شده در مقابل عبور قطارهای سریع‌السیر در دو حالت مدلسازی قطار به صورت بار و مدلسازی با در نظر گرفتن اندرکنش قطار و پل با سیستم روسازی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه تعداد واگنهای عبوری از پل نشان داد که تعداد واگنها فقط در محدوده اولین سرعت تشدید تأثیرگذار هستند. بررسی همزمان مدلسازی قطار به صورت حرکت بارهای متوالی و مدلسازی سیستم پل و قطار با در نظر گرفتن اندرکنش بین آنها نشان داد مقادیر پاسخ به دست آمده از مدلسازی با در نظر گرفتن اندرکنش در بین نواحی پاسخ پل در سرعتهای تشدید و سرعتهای کاهندگی در حالت مدلسازی قطار به صورت حرکت بارهای متوالی است. علاوه بر آن در مدلسازی با در نظر گرفتن اندرکنش، تشدید در سرعتهای کمتری نسبت به مدلسازی قطار به صورت حرکت بارهای متوالی اتفاق می‌افتد و برای اینکه بتوان از مدل قطار به صورت حرکت بارهای متوالی برای ارزیابی عملکرد پل استفاده کرد باید سرعت مورد بررسی قدری بیشتر از سرعت طرح در نظر گرفته شود. بررسی پلهای دو سر ساده با تیر بتنی پیش‌ساخته پیشنهادی در نشریه ۲۹۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی نشان داد که با وجود اینکه این پلها برای باری تقریباً به میزان دو برابر وزن واگن مورد بررسی در حالت استاتیکی طراحی شده‌اند ولی به علت جرم واحد طول کوچک‌تر در مقایسه با پل دهانه ۳۰ متری در سرعتهای بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت شتابی بیشتر از پل دهانه ۳۰ متری در وسط دهانه آنها ایجاد شده است.



شکل ۹. شتاب وارد بر وسط دهانه



شکل ۱۰. ضربه ضربه جابجایی وسط دهانه

۹. پی‌نوشتها

۱۰. مراجع

- ذاکری، جبارعلی (۱۳۸۴) "تحلیل اثر خط راه آهن بر واکنش دینامیکی سیستم پل - خط راه آهن - قطار"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۴، زمستان ۱۳۸۴، ص ۲۱۳-۲۲۱.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۶) "نقشه‌های همسان پلها و عرشه پلهای راه آهن دهانه ۱۰ تا ۲۵ متر" نشریه ۲۹۵، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، وزارت راه و ترابری.

1. High speed train
2. Precast concrete girder
3. Prestressed
4. Bridge –train interaction
5. Moving loads
6. Resonance
7. Cancellation
8. Load model
9. Mass model
10. Sprung mass model
11. Closed form solution
12. Shinkansen
13. Impact factor

- skewness", *Journal of Computers and Structures*, No. 87, pp. 1233–1252.
- Newmark, N. M. (1959) "A method of computation for structural dynamics", *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, No. 85, pp. 67–94.
  - Ronagh, H. and Moghimi, H. (2007) "Impact factors for a composite steel bridge using nonlinear dynamic simulation", *International Journal of Impact Engineering*, No. 35, pp. 1228–1243
  - Timoshenko, S. P. (1922) "On the forced vibrations of bridges", *Philosophical Magazine*, No. 43(6), pp. 1018–1019.
  - Xia, H. and Zhang, N. (2005) "Dynamic analysis of railway bridge under high-speed train", *Journal of Computers and Structures*, No. 83, pp. 1891–1901.
  - Yang, Y.B. and Lin, B.H (1995) "Vehicle–bridge interaction analysis by dynamic condensation method", *Journal of Structure Engineering, ASCE*, No. 121(11), pp. 1636–1643.
  - Yang, Y. B., Yau, J. D. and Wu, Y. S. (2004) "Vehicle-bridge interaction dynamics with applications to high-speed railways", 1st. Edition, Singapore: World Scientific Publishing Company.
  - Delgado, R., Calçada, R., Goicolea, J. M. and Gabaldón, F (2009) "Dynamics of high-speed railway bridges", 1st. Edition, Netherlands: CRC Press.
  - EN1991-2. (2003), Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges.
  - Foda, M.A. and Abduljabbar, Z (1998) "A dynamic Green function formulation for the response of a beam structure to a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, No. 210, pp. 295-306.
  - Fryba, L. (1972) "Vibration of solids and structures under moving loads", 1st. Edition, Groningen (The Netherlands): Noordhoff International Publishing.
  - Liu, K., Reynders, E., Roeck, G. D. and Lombaert, G. (2009) "Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains", *Journal of Sound and Vibration*, No. 320, pp. 201–220.
  - Majka, M (2006) "Dynamic response of railway bridges: analysis of bridge–train interaction using numerical and experimental techniques", Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, National University of Ireland, Galway, Ireland.
  - Majka, M. and Hartnett, M. (2009) "Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge