

# شناسایی غیرمستقیم خصوصیات دینامیکی پل با استفاده از پاسخ وسیله نقلیه عبوری

سید مازیار مرعشی<sup>۱</sup>، محمدهادی پاشایی<sup>۲\*</sup>، محمد مهدی خطیبی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

\*مسئول مکاتبات: mpashaei@nit.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

شناسایی غیرمستقیم  
خصوصیات دینامیکی پل  
پاسخ وسیله نقلیه عبوری

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۱۹

در این مقاله، روش‌های شناسایی غیرمستقیم خصوصیات دینامیکی پل به طور اجمالی بررسی خواهد شد. در روش‌های شناسایی غیرمستقیم، برخلاف روش‌های مستقیم، حسگر بر روی وسیله نقلیه متحرک قرار گرفته و بدون استفاده از حسگرهای روی پل و یا بدون نیاز به متوقف نمودن وسیله نقلیه، شناسایی خصوصیات پل میسر می‌گردد. در ابتدا روش‌های مختلفی که تاکنون برای شناسایی غیرمستقیم فرکانس طبیعی پل ارائه شده است، بیان خواهند شد. در ادامه، روش‌های شناسایی غیرمستقیم میرایی پل بررسی شده‌اند. سپس ضمن طرح روش‌های شناسایی غیرمستقیم شکل مود، مزایا و معایب آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پس از آن، به منظور بررسی عددی شناسایی غیرمستقیم فرکانس‌های طبیعی پل، از مدل عددی یک سازه پل مانند که یک وسیله نقلیه از آن عبور می‌کند، استفاده شده است. نتایج حاصل، نشان‌دهنده دقت و کارایی روش مذکور است. در پایان، به بحث و بررسی و بیان معایب و مزایای روش‌های مختلف و نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته پرداخته می‌شود.

## ۱ مقدمه

به‌طور سنتی، نگهداری پل‌ها بر اساس روش‌های بازرسی بصری صورت می‌گیرد که دقت مناسبی ندارند و تنها می‌تواند زمانی که آسیب قابل رؤیت باشد آن را تشخیص دهد. بنابراین، آسیب پل‌هایی که از نظر سازه‌ای دارای نقص بوده به‌صورت کشف‌نشده باقی می‌ماند. در کشورهایی نظیر ژاپن که مستعد بلایای طبیعی است (شکل ۱)، توصیه می‌گردد که شناسایی ابرسازه‌های مهندسی از قبیل پل‌ها به‌طور پیوسته صورت گیرد [۱]. این توصیه برای کشور ما ایران نیز که از بلایای طبیعی کم‌بهره نیست، لازم و مفید می‌باشد. افزایش بازرسی‌های پل‌ها برای شناسایی نقایص سازه‌ای هزینه‌بر بوده و تمهیدات قابل توجهی برای صاحبان و مدیران راه‌ها دارد (شکل ۲).



(ب)



(الف)



(ج)

**شکل ۲:** (الف) آزمایش مقاومت فشاری (ب) آزمایش کربونیت (ج) آزمایش کلرید [۲].

از آنجا که وجود آسیب در پل باعث تغییر در مشخصات ارتعاشی از قبیل جرم، سفتی و میرایی می‌گردد، می‌توان با بررسی تغییرات در پارامترهای مودال پل به وجود آسیب در آن پی برد [۳].

در اغلب تکنیک‌های شناسایی سلامت پل بر پایه ارتعاش، تعداد زیادی حسگر بر روی سازه نصب می‌شوند [۴]. به‌عنوان نمونه تعداد زیادی حسگر



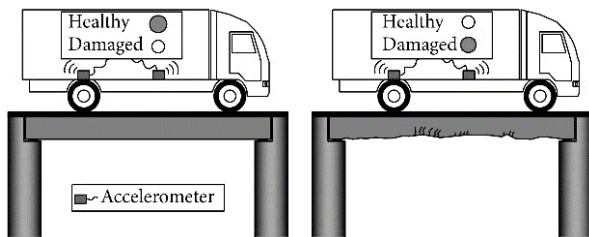
**شکل ۱:** ریزش پل بزرگراهی در ژاپن در اثر زلزله سال ۱۹۹۵ [۱].

مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۶ مثالی از مدل ساده برهم‌کنش وسیله‌نقلیه-پل<sup>۵</sup> برای مطالعه تئوری را نشان می‌دهد (مدل یک چهارم) [۹]. در شکل ۶ به ترتیب  $m_u$  و  $m_s$  به ترتیب جرم وسیله‌نقلیه، جرم لاستیک،  $K_t$  و  $K_s$  به ترتیب سفتی سیستم تعلیق و سفتی لاستیک،  $C_s$  ثابت میرایی سیستم تعلیق،  $y_s$  و  $y_u$  به ترتیب جابجایی عمودی اجرام مذکور می‌باشند. همچنین سرعت وسیله‌نقلیه ( $C$ ) ثابت فرض شده است. درحالی‌که وسیله‌نقلیه در حال عبور از پل می‌باشد، وسیله‌نقلیه و نیز پل مرتعش شده و برهم‌کنشی بین آن دو رخ می‌دهد. بنابراین، پاسخ وسیله‌نقلیه متأثر از پاسخ پل می‌باشد. اگر پل دارای آسیب باشد (به‌عنوان مثال ترک در بتن) آنگاه سفتی، میرایی و یا جرم پل تغییر یافته و در نتیجه پارامترهای دینامیکی پل تغییر می‌نمایند. با توجه به آنچه بیان شد، معادلات حرکت سیستم مذکور به‌صورت زیر خواهند بود:

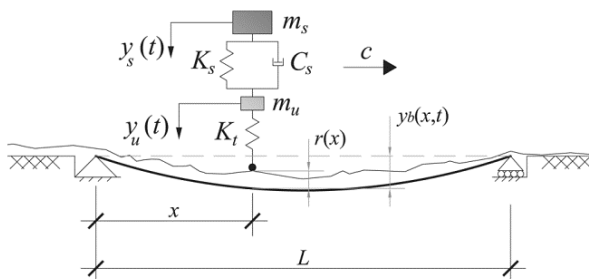
$$m_s \ddot{y}_s + C_s (\dot{y}_s - \dot{y}_u) + K_s (y_s - y_u) = 0,$$

$$m_u \ddot{y}_u - C_s (\dot{y}_s - \dot{y}_u) - K_s (y_s - y_u) + K_t (y_u - y_b - r) = 0,$$

که  $r$  و  $y_b$  به ترتیب پروفیل سطح جاده و جابجایی پل می‌باشند. از این معادلات مشاهده می‌شود که تغییرات ناشی از آسیب می‌تواند در پاسخ وسیله‌نقلیه رؤیت گردد (با حضور عبارت  $y_b$  به‌عنوان جابجایی پل). بنابراین از منظر تئوری تشخیص آسیب صرفاً با استفاده از اندازه‌گیری پاسخ توسط حسگر نصب‌شده بر وسیله‌نقلیه متحرک و بدون استفاده از حسگرهای روی پل و یا بدون نیاز به متوقف نمودن وسیله‌نقلیه، امکان‌پذیر است. مزیت دیگر روش غیرمستقیم این است که حسگر متحرک، تمام پل را می‌پیماید که این امر موجب می‌گردد اطلاعات فضایی بیشتری در مقایسه با روش مستقیم فراهم آید [۱۰، ۱۱].



شکل ۵: مفهوم شناسایی غیرمستقیم سلامت پل [۹].

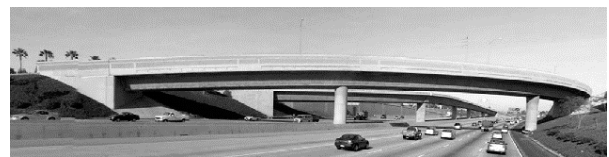


شکل ۶: مدل یک چهارم برهم‌کنش وسیله‌نقلیه-پل [۹].

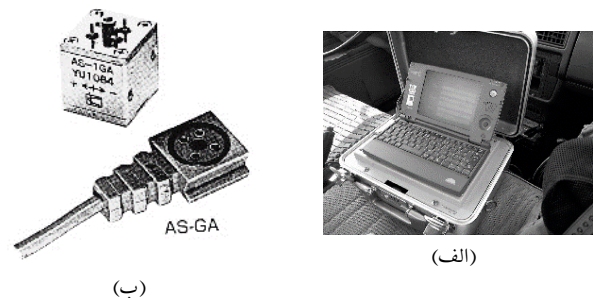
## ۱.۲ شناسایی غیرمستقیم فرکانس پل

امکان استخراج فرکانس‌های پل از پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه عبوری، اولین بار توسط یانگ و همکارانش به‌صورت تحلیلی ارائه شده است [۶] (وسيله

در نمونه‌ای در کالیفرنیا جنوبی (شکل ۳) برای شناسایی سلامت پل در طی دوره هشت ساله نصب گردید [۵]. چنین روش‌هایی که در آن‌ها حسگرها به‌طور مستقیم بر روی پل نصب می‌شوند به روش‌های مستقیم<sup>۱</sup> و نصب‌شده در محل<sup>۲</sup> معروف بوده و ممکن است بنا به مکان و نوع پل، هزینه‌بر، زمان‌بر و حتی خطرناک باشد. روش معمول، نصب حسگرهای ارتعاشی در مکان‌های مختلف روی پل و اتصال آن‌ها به یک سیستم جمع‌آوری داده می‌باشد. اگر برای نصب و راه‌اندازی تجهیزات پایش امکان متوقف کردن ترافیک عبوری وجود نداشته نباشد، نصب تجهیزات می‌تواند پرخطر باشد. بعلاوه، پایش پل‌های دهانه کوچک و متوسط که قسمت اعظمی از پل‌های موجود را شامل می‌شود، فراگیر نشده است. ایده روش غیرمستقیم که در آن خصوصیات دینامیکی پل<sup>۳</sup> از پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه عبوری استخراج می‌گردد، توسط یانگ و همکارانش ارائه گردیده است [۶، ۷]. این روش شامل وسیله‌نقلیه مجهز به حسگر است که خصوصیات دینامیکی پل نظیر فرکانس‌های طبیعی از پاسخ استخراج می‌گردد. در این فرایند، می‌توان وسیله‌نقلیه را به‌عنوان محرک و نیز حسگر به‌کار برد. امکان اجرای چنین روشی در عمل توسط لین و یانگ [۸] با عبور دادن یک وسیله‌نقلیه مجهز به حسگر (شکل ۴) بر روی پل در تایوان ارزیابی شده است.



شکل ۳: پل روگذر غربی در کالیفرنیا جنوبی [۵].



شکل ۴: تجهیزات بکارگرفته‌شده (الف) سیستم کنترل مرکزی (ب) شتاب‌سنج [۸].

بسیاری از محققان در دهه گذشته، روش‌های جدیدی بر مبنای شناسایی غیرمستقیم<sup>۴</sup> پل ارائه داده‌اند. اگرچه این ایده در ابتدا تنها شامل استخراج اولین فرکانس طبیعی پل بوده، اما بعدها به تخمین میرایی و شکل مود نیز گسترش یافته است. همچنین برخی از تکنیک‌های تشخیص آسیب نیز بر اساس پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه ارائه گردیده‌اند.

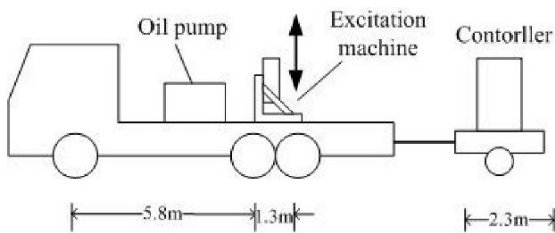
## ۲ تئوری شناسایی غیرمستقیم خصوصیات پل

ایده روش غیرمستقیم با استفاده از وسیله‌نقلیه در شکل ۵ ارائه شده است [۹]. حسگر (غالباً شتاب‌سنج) معمولاً بر روی محور وسیله‌نقلیه قرار داده می‌شود. بنابراین وسیله‌نقلیه عبوری بر روی پل به‌عنوان یک حسگر متحرک

<sup>1</sup>direct <sup>2</sup>on-site <sup>3</sup>dynamic properties of bridge <sup>4</sup>indirect monitoring <sup>5</sup>Vehicle-Bridge Interaction (VBI)

در سرعت‌های متفاوت را قبل از تأیید نهایی استخراج فرکانس طبیعی پل توصیه نمودند. همچنین، وجود عبور و مرور برای شناسایی فرکانس طبیعی پل از وسیله نقلیه را مفید دانسته‌اند. به‌ویژه، یک‌ککش سنگین با وزن ۲۱/۰۵ تن به‌عنوان ترافیک عبوری مورد استفاده قرار گرفته و به‌عنوان افزایش دهنده پاسخ پل و در نتیجه افزایش دهنده مقدار پاسخ یکدک و بهبوددهنده وضوح قله فرکانسی در نظر گرفته شده است.

اوشیما و همکارانش [۱۲] در تحقیق آزمایشگاهی نشان دادند که استفاده از موتور محرک و تکرار آزمایش می‌تواند برای استخراج فرکانس‌های پایین مفید باشد (شکل ۸). اوشیما و همکارانش [۱۳] همچنین آنالیز ترکیبی غیروابسته<sup>۸</sup> را در مطالعه عددی به منظور تخمین فرکانس‌های طبیعی پل از پاسخ وسیله نقلیه بکار بردند. مدل سیستم برهم‌کنشی با ترکیب فضای حالت و مدل‌های خودبازگشتی<sup>۹</sup> و پروفیل سطح جاده در شبیه‌سازی‌ها بکار گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که این روش پروفیل سطح را به خوبی تخمین می‌زند، اما به دلیل وابستگی آن به مرتبه مدل خودبازگشتی، پاسخ پل را به خوبی تخمین نمی‌زند. بعلاوه، چندین مدل خودبازگشتی برای تعیین بهترین مرتبه مدل باید به‌کار گرفته شود.

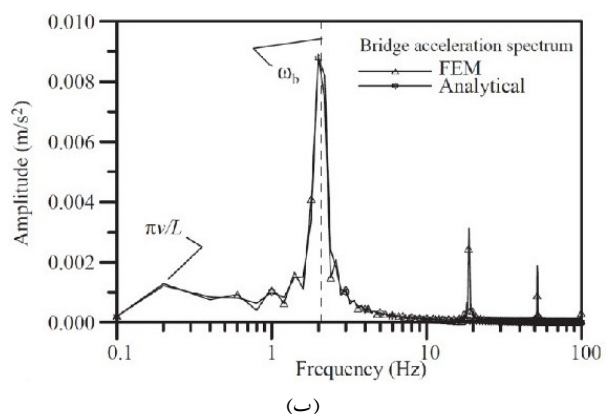
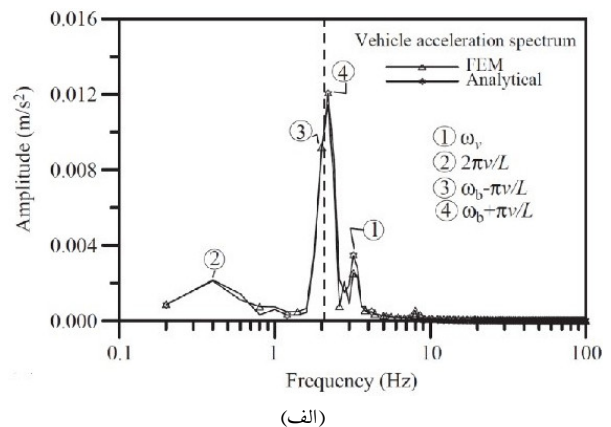


شکل ۸: وسیله نقلیه محرک [۱۲].

یانگ و چانگ [۱۴] تأثیر چندین پارامتر، از قبیل پارامترهای مربوط به سرعت وسیله نقلیه و نسبت مقدار شتاب قائم وسیله نقلیه به شتاب پل، بر پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در استخراج فرکانس طبیعی پل، اندازه قله فرکانس انتقال یافته پل در مقایسه با اندازه قله فرکانس وسیله نقلیه، حائز اهمیت است. علاوه بر این، نسبت شتاب قائم اولیه وسیله نقلیه به شتاب پل نیز حائز اهمیت می‌باشد؛ هر چه این نسبت کوچک‌تر باشد احتمال استخراج موفقیت‌آمیز فرکانس طبیعی پل بیشتر می‌گردد.

از آنجا که در روش یانگ و همکارانش [۶] تنها مود اول پل در نظر گرفته شده است، یانگ و چانگ [۱۵] روش تجزیه مود تجربی<sup>۱۰</sup> را به منظور در نظر گرفتن مودهای بالاتر، بکار گرفتند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از این روش، چند فرکانس طبیعی نخست پل در بررسی‌های عددی و تا دومین فرکانس طبیعی پل در آزمایش با ابعاد واقعی، شناسایی شده‌اند. همانطور که توسط لین و یانگ [۸] توصیه شده، حداقل سه بار عبور از پل باید انجام پذیرد تا استخراج موفقیت‌آمیز فرکانس طبیعی تأیید گردد. همچنین، توصیه شده که وسیله نقلیه آزمایش طوری طراحی گردد که فرکانس‌های طبیعی آن برابر با فرکانس‌های طبیعی پل نباشند و نیز تمام خصوصیات دینامیکی وسیله نقلیه شناخته شده و یا حداقل مدل وسیله نقلیه در دسترس باشد.

نقلیه به‌صورت یک سیستم جرم-فنر یک درجه آزادی و پل به‌صورت یک تیر دو سر مفصل مدل و صرفاً مود اول پل در نظر گرفته شده است). سپس فرکانس طبیعی پل با استفاده از تبدیل فوریه سریع<sup>۶</sup> شتاب وسیله نقلیه بدست آمده است. بررسی تحلیلی نشان داده است که پاسخ وسیله نقلیه دارای چهار فرکانس غالب می‌باشد: فرکانس طبیعی وسیله نقلیه  $(\sqrt{\frac{k_v}{m_v}})$ ، فرکانس حرکت وسیله نقلیه  $(\frac{v}{L})$  و دو فرکانس انتقال یافته پل  $(\omega_b \pm \frac{\pi v}{L})$  (شکل ۷). یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق را می‌توان توانایی این روش در سرعت‌های بالا ذکر نمود. شایان ذکر است که پروفیل سطح جاده و نیز مدل کامل ارتعاشی وسیله نقلیه در نظر گرفته نشده است.



شکل ۷: طیف شتاب عمودی (الف) وسیله نقلیه و (ب) پل (سرعت ۱۰ متر بر ثانیه،  $\omega_b$  فرکانس طبیعی پل و  $\omega_v$  فرکانس وسیله نقلیه می‌باشد) [۹].

همچنین یانگ و لین [۷] تحقیقاتی را با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر برای بررسی امکان اجرای شناسایی فرکانس طبیعی پل به انجام رسانیده‌اند. امکان استخراج اولین فرکانس طبیعی پل از پاسخ وسیله نقلیه عبوری<sup>۷</sup> توسط لین و یانگ [۸] طی آزمایشی بر روی پلی در مقیاس واقعی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور یک سیستم یکدک و یک‌ککش بر روی پلی با دهانه ۳۰ متر به‌کار گرفته شده است. یک‌ککش به‌عنوان محرک پل عمل کرده در حالی که یکدک به‌عنوان حسگر ارتعاش پل (توسط شتاب‌سنج) می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سرعت‌های پایین (۱۱/۱ متر بر ثانیه) به دلیل وضوح طیفی بالا و کاهش تأثیر پروفیل جاده بر پاسخ یکدک، بهترین نتایج را ایجاد می‌کند. در سرعت‌های بالاتر، اجزاء فرکانس بالای مربوط به سازه یکدک و پروفیل سطح جاده در پاسخ غالب می‌شوند. نویسندگان، انجام سه آزمایش مختلف

<sup>6</sup>Fast Fourier Transform (FFT) <sup>7</sup>dynamic response of a passing vehicle models <sup>8</sup>Independent Component Analysis (ICA) <sup>9</sup>Autoregressive (AR) <sup>10</sup>Empirical Mode Decomposition (EMD)



برای تخمین میرایی پل با استفاده از وسیله نقلیه صورت گرفته است. مک‌گتیک و همکارانش [۲۴] مسأله شناسایی فرکانس طبیعی پل و ضرب میرایی با استفاده از وسیله نقلیه متحرک را مورد بررسی قرار دادند. نویسندگان نشان دادند که اندازه چگالی طیف توان شتاب وسیله نقلیه با افزایش میرایی پل کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که حتی اگر قله فرکانسی پل به طور واضح مشخص نباشد، تغییرات در میزان میرایی پل می‌تواند توسط آنالیز قله‌های فرکانسی وسیله نقلیه بدست آید. تغییرات در اندازه چگالی طیفی توان می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از وجود آسیب در پل مورد استفاده قرار گیرد. اما نویسندگان متذکر شده‌اند که تشخیص تغییرات فرکانس و میرایی در حضور پروفیل سطح، دشوار می‌باشد [۲۵، ۲۶].

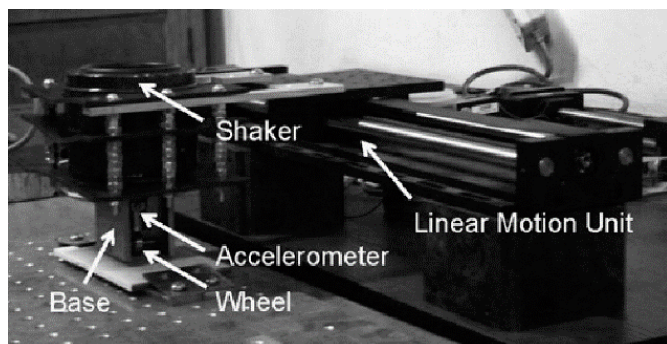
گونزالز و همکارانش [۲۷] روشی نوین برای شناسایی میرایی پل با استفاده از پاسخ وسیله نقلیه متحرک ارائه نمودند که به‌عنوان اولین روش شناسایی وضعیت پل معروف است. در این روش، الگوریتمی شش مرحله‌ای ارائه شده که از پاسخ دو محور مدل نیم‌خودرو<sup>۱۴</sup> استفاده می‌کند. در شبیه‌سازی، میرایی پل با دقت قابل قبولی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش نسبت به پروفیل جاده، سطح پایین نویز و خطاهای مدل‌سازی نسبتاً غیرحساس می‌باشد. علاوه بر این، یکی از مزایای این روش آن است که می‌تواند برای تخمین سفتی پل توسعه یابد [۲۸].

اگر چه شناسایی غیرمستقیم میرایی از توانایی‌های این روش است، اما محدودیت‌های مشخصی در مقایسه با روش‌های متمرکز بر فرکانس و شکل مود دارد. بنابراین اجرای عملی روش‌های غیرمستقیم متمرکز بر میرایی، از ملاحظات ویژه‌ای برخوردار است.

### ۳.۲ شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل

تخمین شکل مودهای پل در بررسی رفتار دینامیکی آن مهم است، زیرا ناپیوستگی شکل مود در نقاط دارای آسیب اتفاق می‌افتد که شامل ناپیوستگی شیب در نقاط مربوطه است. از تغییر انحنای شکل مود می‌توان برای تشخیص ناپیوستگی‌ها استفاده کرد [۲۹، ۳۰]. همچنین، شکل مودهای پل می‌تواند در به‌روزرسانی مدل پل مورد استفاده قرار گیرد [۳۱].

ژانگ و همکارانش [۳۲] با استفاده از شتاب‌سنج و لرزاننده<sup>۱۵</sup> عبور وسیله نقلیه از پل را مدل‌سازی نمودند (شکل ۹).



شکل ۹: تصویری از جانمایی آزمایش [۳۲].

در تحقیقی آزمایشگاهی که در آن تغییرات فرکانس پل شناسایی شده است، سردا و همکارانش [۱۶] نتایج یک روش غیرمستقیم پایش سلامت پل را با روش مستقیم مقایسه نمودند. در آن تست، وسیله نقلیه‌ای دو محوره از روی پلی دو سر مفصل عبور نموده است. تغییرات شرایط پل توسط اضافه نمودن جرم‌های اضافه در خط وسط صورت گرفته و تغییرات فرکانس پل با متوسط‌گیری تبدیل فوریه شتاب شناسایی شده است. نویسندگان همچنین اشاره داشتند که سرعت‌های پایین‌تر وسیله نقلیه نتایج بهتری را فراهم می‌آورد. پروفیل سطح جاده باعث می‌شود که فرکانس‌های طبیعی وسیله نقلیه معمولاً به‌عنوان فرکانس‌های غالب در طیف پاسخ وسیله نقلیه ظاهر شوند که موجب دشواری تشخیص فرکانس‌های طبیعی پل می‌گردد [۱۷]. یانگ و همکارانش [۱۸] با اعمال چند روش فیلترینگ موجب حذف فرکانس طبیعی وسیله نقلیه از طیف پاسخ شدند. آن‌ها پیشنهاد دادند که اگر فرکانس‌های طبیعی وسیله نقلیه موجود باشد، فیلتر نمودن آن‌ها از طیف پاسخ و در نتیجه افزایش وضوح فرکانسی ممکن خواهد بود.

یکی از اولین روش‌ها برای استخراج فرکانس پل از پاسخ وسیله نقلیه، مبتنی بر بهینه‌سازی می‌باشد. لی و همکارانش [۱۹] با توسعه الگوریتم جستجوی الگوی توسعه‌یافته<sup>۱۱</sup>، روشی سریع‌تر را ارائه کرده‌اند. یکی از مزایای این روش توانایی آن در شناسایی پارامترهای دیگر از قبیل سفتی پل به همراه اولین فرکانس طبیعی پل می‌باشد. روش پیشنهادی می‌تواند فرکانس طبیعی را در حضور نویز به‌طور نسبتاً دقیق تخمین بزند. اگر چه این روش مقاومت خوبی در سطوح مختلف نویز دارد (با حداکثر خطای ۳/۳ درصد برای نسبت سیگنال به نویز ۵) اما پروفیل سطح جاده را در نظر نگرفته است. ملک جعفریان و اوپریان [۲۰] یک روش آنالیز مودال فقط‌خروجی<sup>۱۲</sup> با نام تجزیه حوزه فرکانسی<sup>۱۳</sup> را بکار گرفتند تا پاسخ از وسیله نقلیه متحرک بدست آید. روش تجزیه حوزه فرکانسی بر سیگنال‌های شتاب حاصله از دو وسیله نقلیه متوالی اعمال گردیده است. تأثیر روش تجزیه حوزه فرکانسی برای حالتی که فرکانس‌های پل و وسیله نقلیه نزدیک هم باشند، در حضور پروفیل جاده و با سرعت کم (در حدود ۲ متر بر ثانیه) مورد مطالعه قرار گرفته است. نویسندگان نشان دادند که روش تجزیه حوزه فرکانسی می‌تواند فرکانس طبیعی پل و نیز فرکانس طبیعی وسیله نقلیه را شناسایی کند و ممکن است جایگزین مفیدی برای استفاده مستقیم از تبدیل فوریه سریع باشد.

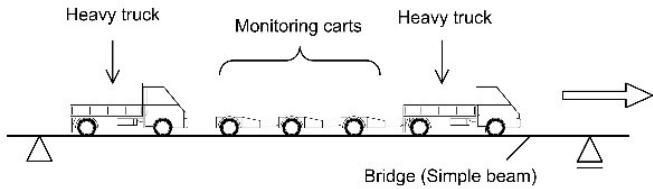
یانگ و همکارانش [۲۱] تغییرات فرکانس‌های طبیعی پل حین عبور وسیله نقلیه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که اگر یک وسیله نقلیه متحرک به‌عنوان ابزاری برای شناسایی فرکانس‌های طبیعی پل یا برای تشخیص آسیب پل مورد استفاده قرار گیرد، اختلاف فرکانس ناشی از حضور وسیله نقلیه باید در نظر گرفته شود، به‌ویژه برای حالتی که جرم وسیله نقلیه در مقایسه با جرم پل قابل صرف‌نظر نباشد.

### ۲.۲ شناسایی غیرمستقیم میرایی پل

میرایی یکی از خواص دینامیکی است که نسبت به آسیب، حساس می‌باشد [۲۲، ۲۳]. با توجه به ساختار پیچیده میرایی در سازه‌ها، تحقیقات اندکی

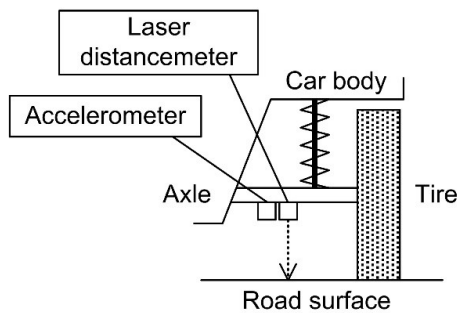
<sup>11</sup>Generalized Pattern Search Algorithm (GPSA) <sup>12</sup>Output-only Modal Analysis <sup>13</sup>Frequency Domain Decomposition (FDD) <sup>14</sup>half-car <sup>15</sup>shaker

اوشیما و همکارانش [۳۴] روشی را برای شناسایی آسیب پل طرح‌ریزی نمودند که شامل تخمین شکل مودهای پل از پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه متحرک می‌باشد. در این روش، شکل مودهای حاصل از روش تجزیه مقدار ویژه به منظور تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، این آزمایش توسط دو یدک‌کش سنگین دو محوره و چند وسیله نقلیه شناسایی تک‌محوره صورت گرفته است.



شکل ۱۱: کاروان وسایل نقلیه شناسایی و کامیون‌های سنگین عبوری از پل [۳۴].

در این روش، شتاب وسیله نقلیه شناسایی و جابجایی نسبی بین محور و سطح جاده اندازه‌گیری شده است. توصیه می‌شود که این اندازه‌گیری‌ها در عمل به ترتیب توسط شتاب‌سنج و لیزر فاصله‌سنج که بر محور وسیله نقلیه نصب شده، بدست آید (شکل ۱۲).

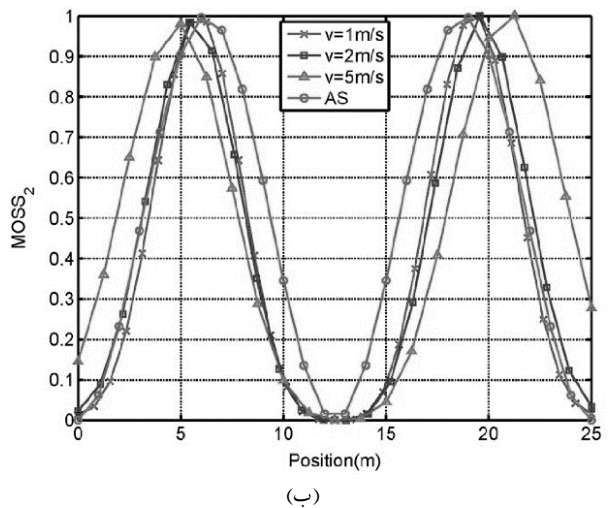
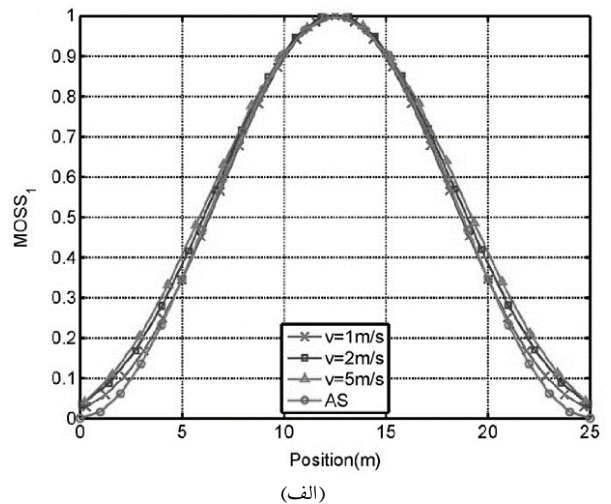


شکل ۱۲: مکان قرارگیری لیزر فاصله‌سنج و شتاب‌سنج بر روی محور وسیله نقلیه [۳۴].

نتایج نشان می‌دهد که میانگین مقادیر معیار اطمینان مودال<sup>۱۹</sup> به تعداد وسایل نقلیه تک محوره وابسته است. هنگامی که نویز اندازه‌گیری بزرگ‌تر از ۱ درصد باشد، این روش نیازمند تعداد اندازه‌گیری‌های بی‌شماری است که یکی از موانع اصلی برای کاربرد عملی این روش می‌باشد.

ملک‌جعفریان و اوپرایان [۳۵] استفاده از روش تجزیه حوزه فرکانسی زمان کوتاه<sup>۲۰</sup> برای شناسایی شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ اندازه‌گیری شده از دو محور متوالی را ارائه نمودند. آن‌ها روش تجزیه حوزه فرکانسی را بر سیگنال‌های زمان کوتاه در طی چندین مرحله، اعمال و فرآیند میزان‌سازی مجدد را بر بردارهای شکل مود موضعی اجرا نمودند تا شکل مودهای کلی بدست آید. تأثیر پروفیل جاده یکی از مشکلات مهم این روش است. نتایج نشان می‌دهد که تحریک پل توسط نیروهای خارجی (سایر رفت و آمدها) بر تمام قسمت‌ها شرایط را بهبود می‌بخشد. در غیاب سایر رفت و آمدها، تفاضل سیگنال دو محور به منظور راهی جایگزین برای کاهش تأثیر پروفیل جاده معرفی گردیده است. اگر نویز کم و سرعت وسیله نقلیه ۲ متر بر ثانیه و یا کمتر باشد، شکل مودها می‌تواند با دقت قابل قبولی بدست آیند. همچنین

در این روش، شاخص آسیب جدیدی بر مبنای امیدانس نقطه‌ای ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اندازه طیف بدست آمده از امیدانس نقطه‌ای تقریباً با مربع شکل مود<sup>۱۶</sup> متناسب است که می‌تواند برای تشخیص آسیب بکار رود (شکل ۱۰). اگرچه هدف اصلی این روش، تخمین شکل مودهای پل نیست اما اولین کاربرد روش‌های غیرمستقیم برای شناسایی مشخصه‌های مرتبط با شکل مود می‌باشد. نویسندگان بر این نکته تأکید نمودند که این روش می‌تواند به منظور حصول مقادیر مطلق شکل مودها نیز توسعه یابد. شایان ذکر است که، روش برای سرعت‌های نسبتاً پایین (کمتر از ۵ متر بر ثانیه) به‌کار گرفته شده است.

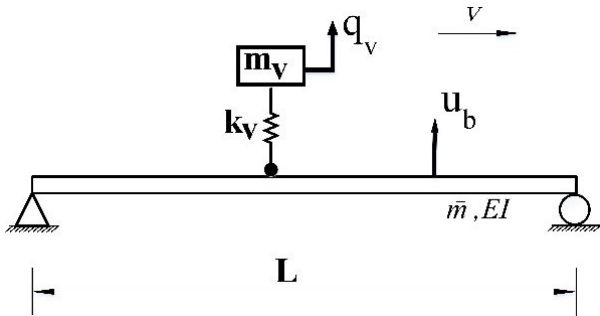


شکل ۱۰: مربع شکل مود (MOSS) استخراج شده در سرعت‌های مختلف وسیله نقلیه در مقایسه با حل تحلیلی (AS): (الف) مود اول (ب) مود دوم [۳۲].

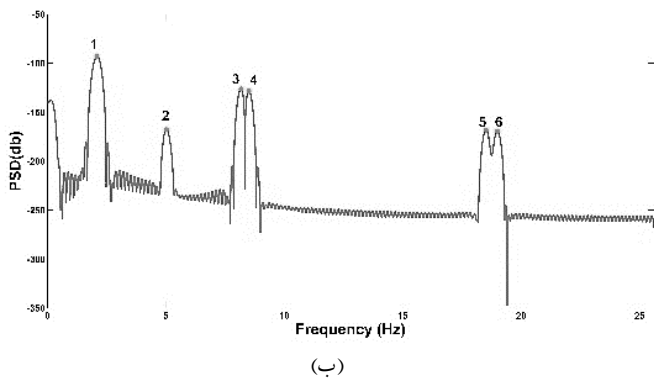
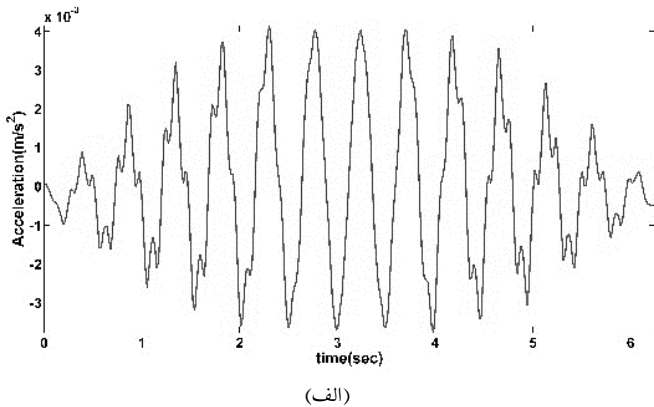
یانگ و همکارانش [۳۳] روشی تئوری برای شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل معرفی نمودند. آن‌ها نشان دادند که، دامنه‌ی بخشی از پاسخ وسیله نقلیه که مربوط به یکی از فرکانس‌های طبیعی پل می‌باشد، دقیقاً متناظر با شکل مود آن فرکانس است. بنابراین پس از شناسایی فرکانس طبیعی پل، جزء پاسخ مربوط به آن فرکانس می‌تواند به‌عنوان شکل مود متناظر محسوب گردد. این امر با استفاده از تبدیل هیلبرت<sup>۱۷</sup> پاسخ فیلتر شده میان گذر<sup>۱۸</sup> انجام شده است.

<sup>16</sup>Square of the Mode Shape (MOSS) <sup>17</sup>Hilbert Transform <sup>18</sup>band-pass filtered response <sup>19</sup>Modal Assurance Criterion (MAC) <sup>20</sup>Short Time Frequency Domain Decomposition (STFDD)

میانگین این اعداد برابر فرکانس طبیعی پل است (قله‌های شماره ۳، ۴ و ۶، ۵ در شکل ۱۴ ب). اما برای فرکانس طبیعی اول، به دلیل اختلاف بسیار ناچیز فرکانس‌های انتقال‌یافته از هم، شناسایی دو قله دشوار بوده و معمولاً قابل مشاهده نمی‌باشد [۱۵]. شایان ذکر است که قله شماره ۲ در شکل ۱۴ ب مربوط به فرکانس طبیعی وسیله نقلیه می‌باشد ( $\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}$ ).



شکل ۱۳: مدل برهم‌کنش پل-وسیله نقلیه



شکل ۱۴: (الف) سیگنال شتاب وسیله نقلیه (ب) چگالی طیف توان سیگنال شتاب وسیله نقلیه

جدول ۲: مقایسه فرکانس‌های طبیعی

خطا (درصد)	شبیه‌سازی (Hz)	حل تحلیلی (Hz)	
۰/۹۶	۲/۱۰	۲/۰۸	فرکانس طبیعی اول
۰/۱۲	۸/۳۴	۸/۳۳	فرکانس طبیعی دوم
۰/۰۵	۱۸/۷۶	۱۸/۷۵	فرکانس طبیعی سوم

اعمال رفت و آمد بر روی پل می‌تواند حساسیت روش به نویز را کاهش دهد. همچنین، الگوریتم دیگر برای تخمین شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ وسیله نقلیه عبوری توسط ملک‌جعفریان و اوبرایان [۲۶] ارائه شده است. یک یدک و یدک‌کش به محرک خارجی مجهز شده است تا در فرکانسی نزدیک به یکی از فرکانس‌های طبیعی پل تحریک نماید. این تحریک باعث می‌شود که پاسخ پل در آن فرکانس طبیعی غالب شود. پاسخ شتاب از دو محور متوالی از یک وسیله نقلیه اندازه‌گیری شده است. دامنه سیگنال شامل شکل انحنای در حال کار<sup>۲۱</sup> می‌باشد که می‌تواند برای تخمین شکل مودهای پل مورد استفاده قرار گیرد. انرژی پاسخ حاصل از دو محور متوالی از تبدیل هیلبرت حاصل آمده است. با استفاده از پروسه میزان‌سازی، شکل مودهای پل می‌تواند با وضوح و دقت بالا تخمین زده شوند. مفهوم تفاضل پاسخ دو محور مشابه متوالی نیز برای حذف اثر زبری سطح مورد استفاده قرار گرفته است.

به نظر می‌رسد که روش‌های شناسایی غیرمستقیم پل که تمرکز بر شناسایی شکل مودهای پل دارند، دارای قابلیت‌های بالقوه‌ای می‌باشند. اما در حال حاضر این روش‌ها به علت کمبود مطالعات میدانی برای بررسی برخی موانع عملیاتی، محدود شده‌اند.

### ۳ شبیه‌سازی استخراج فرکانس‌های طبیعی پل از پاسخ وسیله نقلیه عبوری

در این بخش، با استفاده از نرم‌افزار متلب، حرکت وسیله نقلیه‌ای با سرعت ثابت ۴ متر بر ثانیه بر روی پلی به طول ۲۵ متر شبیه‌سازی شده است. پل به صورت تیر دوسر مفصل اوایلر-برنولی و وسیله نقلیه به صورت یک سیستم جرم و فنر یک درجه آزادی مفروض است (شکل ۱۳). خصوصیات پل و وسیله نقلیه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات پل و وسیله نقلیه

	طول پل (m) L
۲۵	طول پل (m) L
۲۷/۵	مدول الاستیسیته پل (GN/m <sup>۲</sup> ) E
۰/۱۲	ممان اینرسی پل (m <sup>۴</sup> ) I
۴۸۰۰	جرم واحد طول پل (kg/m) m-bar
۵۰۰	جرم وسیله نقلیه (kg) m_v
۵۰۰	سفتی وسیله نقلیه (kN/m) k_v

به منظور مدل‌سازی برهم‌کنش پل و وسیله نقلیه، سطح پل کاملاً هموار در نظر گرفته شده است. عبور وسیله نقلیه باعث ارتعاش پل و در نتیجه ارتعاش وسیله نقلیه می‌گردد. در شکل ۱۴ الف سیگنال شتاب وسیله نقلیه نشان داده شده است. چگالی طیف توان سیگنال شتاب وسیله نقلیه، با در نظر گرفتن سه مود اول ارتعاشی، زمان نمونه‌برداری ۱۹۵/۰ ثانیه و تابع پنجره همینگ<sup>۲۲</sup> به صورت شکل ۱۴ ب می‌باشد.

جدول ۲ مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی استخراج شده از این نمودار و نتایج تحلیلی را نشان می‌دهد. با توجه به حرکت وسیله نقلیه، در هر فرکانس طبیعی دو فرکانس انتقال یافته (چپ و راست) بوجود می‌آید که

<sup>21</sup>Operational Deflected Shape <sup>22</sup>Hamming Window

## ۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله در ابتدا به بررسی اجمالی روش‌های شناسایی غیرمستقیم خصوصیات دینامیکی پل (فرکانس طبیعی، ضریب میرایی و شکل مود) پرداخته شد. زمانی که صرفاً فرکانس طبیعی پل مورد نیاز باشد، استفاده از روش غیرمستقیم در مقایسه با روش‌های مستقیم ترجیح داده می‌شود. زیرا روش غیرمستقیم دارای مزایای بسیاری از قبیل مقرون به صرفه بودن، سهولت، بهره‌وری، عدم نیاز به تجهیزات زیاد و حضور افراد متخصص در محل می‌باشد. اگرچه امکان استخراج فرکانس پل از پاسخ وسیله نقلیه عبوری از نظر تئوری و عملی پایه‌ریزی شده است اما مشکلات و موانعی وجود دارد تا این روش به‌صورت مؤثر و قابل اطمینان مورد استفاده قرار گیرد. اهم این مشکلات عبارتند از: (الف) تأثیر پروفیل جاده در پاسخ وسیله نقلیه که سبب کاهش وضوح قله‌های فرکانسی پل می‌گردد (ب) تغییر فرکانس پل تحت اثر برهم‌کنش با وسیله نقلیه.

در شناسایی غیرمستقیم میرایی پل، توجه به این نکته حائز اهمیت است که ساختار پیچیده میرایی باعث تفاوت نتایج مدل‌سازی با نتایج حاصل از مطالعات میدانی می‌گردد. لذا تحقیقات بیشتری پیرامون این امر مورد نیاز است.

روش‌های شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل در مواردی نیاز به بهبود و اعتبارسنجی دارند، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: (الف) افزایش وضوح شکل مود (ب) کاهش در حساسیت به نویز اندازه‌گیری شده (ج) قابلیت اجرا در سرعت‌های بالاتر (د) مطالعات آزمایشگاهی.

در ادامه، به منظور بررسی عددی شناسایی غیرمستقیم فرکانس‌های طبیعی پل، یک سازه پل مانند بصورت یک تیر اوپلر-برنولی دوسر مفصل مدل و یک سیستم جرم-فنر یک درجه آزادی از روی آن عبور داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دهنده، دقت و کارایی روش بکارگرفته‌شده دارد.

## مراجع

- [6] Yang, Y-B, Lin, CW, and Yau, JD. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5):471-493, 2004.
- [7] Yang, YB and Lin, CW. Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications. *Journal of sound and vibration*, 284(1-2):205-226, 2005.
- [8] Lin, CW and Yang, YB. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification. *Engineering Structures*, 27(13):1865-1878, 2005.
- [9] Malekjafarian, Abdollah, McGetrick, Patrick J, and OBrien, Eugene J. A review of indirect bridge monitoring using passing vehicles. *Shock and vibration*, 2015, 2015.
- [10] Khorram, A, Bakhtiari-Nejad, F, and Rezaeian, M. Comparison studies between two wavelet based crack detection methods of a beam subjected to a moving load. *International Journal of Engineering Science*, 51:204-215, 2012.
- [11] Kong, X, Cai, CS, and Kong, B. Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(1):04014102, 2014.
- [12] Oshima, Y, Yamaguchi, T, Kobayashi, Y, and Sugiura, K. Eigenfrequency estimation for bridges using the response of a passing vehicle with excitation system. in *Proceedings of the fourth international conference on bridge maintenance, safety and management*, pp. 3030-3037, 2008.
- [13] Oshima, Y, Yamamoto, K, Sugiura, K, and Yamaguchi, T. Estimation of bridge eigenfrequencies based on vehicle responses using ica. in *Proceedings of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 09)*, 2009.
- [14] Yang, YB and Chang, KC. Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle: Parametric study. *Engineering Structures*, 31(10):2448-2459, 2009.
- [15] Yang, YB and Chang, KC. Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the emd technique. *Journal of sound and vibration*, 322(4-5):718-739, 2009.
- [16] Cerda, Fernando, Garrett, James, Bielak, Jacobo, Rizzo, Piervincenzo, Barrera, JA, Zhang, Z, Chen, Siheng, McCann, Michael T, and Kovacevic, Jelena. Indirect structural health monitoring in bridges: scale experiments. in *Proc. Int. Conf. Bridge Maint., Safety Manag., Lago di Como*, pp. 346-353, 2012.
- [17] Siringoringo, Dionysius M and Fujino, Yozo. Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle: analytical and experimental study. *Advances in Structural Engineering*, 15(3):417-433, 2012.
- [18] Yang, YB, Chang, KC, and Li, YC. Filtering techniques for extracting bridge frequencies from a test vehicle moving over the bridge. *Engineering Structures*, 48:353-362, 2013.
- [19] Li, Wei-ming, Jiang, Zhi-hui, Wang, Tai-long, and Zhu, Hong-ping. Optimization method based on generalized pattern search algorithm to identify bridge parameters indirectly by a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 333(2):364-380, 2014.
- [1] Fujino, Yozo and Siringoringo, DM. Bridge monitoring in japan: the needs and strategies. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(7-8):597-611, 2011.
- [2] Chupanit, Punya and Phromsorn, Chayatan. The importance of bridge health monitoring. *International Science Index*, 6:135-138, 2012.
- [3] Das, Swagato, Saha, P, and Patro, SK. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3):477-507, 2016.
- [4] Carden, E Peter and Fanning, Paul. Vibration based condition monitoring: a review. *Structural health monitoring*, 3(4):355-377, 2004.
- [5] Gomez, Hugo C, Fanning, Paul J, Feng, Maria Q, and Lee, Sungchil. Testing and long-term monitoring of a curved concrete box girder bridge. *Engineering Structures*, 33(10):2861-2869, 2011.



- [35] Malekjafarian, Abdollah and OBrien, Eugene J. Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle. *Engineering Structures*, 81:386–397, 2014.
- [36] Malekjafarian, Abdollah and OBrien, Eugene J. On the use of a passing vehicle for the estimation of bridge mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 397:77–91, 2017.
- [20] Malekjafarian, Abdollah and OBrien, Eugene J. Application of output-only modal method to the monitoring of bridges using an instrumented vehicle. *Civil engineering research in Ireland*, 2014.
- [21] Yang, YB, Cheng, MC, and Chang, KC. Frequency variation in vehicle-bridge interaction systems. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 13(02):1350019, 2013.
- [22] Curadelli, RO, Riera, JD, Ambrosini, D, and Amani, MG. Damage detection by means of structural damping identification. *Engineering Structures*, 30(12):3497–3504, 2008.
- [23] Modena, Claudio, Sonda, Devis, and Zonta, Daniele. Damage localization in reinforced concrete structures by using damping measurements. in *Key engineering materials*, vol. 167, pp. 132–141. Trans Tech Publ, 1999.
- [24] McGetrick, Patrick J, Gonzlez, A, and OBrien, Eugene J. Theoretical investigation of the use of a moving vehicle to identify bridge dynamic parameters. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 51(8):433–438, 2009.
- [25] McGetrick, P, Kim, Chul-Woo, and OBrien, Eugene J. Experimental investigation of the detection of bridge dynamic parameters using a moving vehicle. in *Proceedings of the 23rd KKCNN Symposium on Civil Engineering*, 2010.
- [26] Kim, Chul-Woo, Isemoto, R, McGetrick, P, Kawatani, Mitsuo, and O'Brien, Eugene J. Drive-by bridge inspection from three different approaches. *Smart Structures and Systems*, 13(5):775–796, 2014.
- [27] González, Arturo, OBrien, Eugene J, and McGetrick, P.J. Identification of damping in a bridge using a moving instrumented vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 331(18):4115–4131, 2012.
- [28] Williams, C and Salawu, OS. Damping as a damage indication parameter. in *Proceedings of the 15th international modal analysis conference*, vol. 3089, p. 1531, 1997.
- [29] Pandey, AK, Biswas, M, and Samman, MM. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of sound and vibration*, 145(2):321–332, 1991.
- [30] Zhu, XQ and Law, SS. Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history. *International Journal of Solids and Structures*, 43(7-8):2299–2317, 2006.
- [31] Arora, Vikas, Singh, SP, and Kundra, TK. Damped model updating using complex updating parameters. *Journal of Sound and Vibration*, 320(1-2):438–451, 2009.
- [32] Zhang, Yao, Wang, Longqi, and Xiang, Zhihai. Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 331(2):291–307, 2012.
- [33] Yang, YB, Li, YC, and Chang, KC. Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study. *Smart Structures and Systems*, 13(5):797–819, 2014.
- [34] Oshima, Yoshinobu, Yamamoto, Kyosuke, and Sugiura, Kunitomo. Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles. *Smart Structures and Systems*, 13(5):731–753, 2014.