

## مکان‌یابی آسیب در پل در حضور پروفیل سطح جاده با استفاده از اندازه‌گیری ارتعاشات وسیله نقلیه عبوری

سیدمازیار مرعشی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
محمدهادی پاشایی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
محمد مهدی خطیبی، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

Email: mpashaei@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۸

### چکیده

مکان‌یابی مستقیم آسیب در پل مستلزم به‌کارگیری تعداد زیادی حسگر ارتعاشی روی سازه است که این امر معمولاً پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. در برهم‌کنش وسیله نقلیه-پل، پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه عبوری شامل پاسخ ارتعاشی پل نیز می‌باشد که می‌توان از آن برای استخراج پارامترهای مودال پل بهره برد. در این مقاله، به منظور مکان‌یابی غیرمستقیم آسیب در پل از نسبت انتقال‌پذیری پاسخ وسیله نقلیه استفاده شده است. با نصب شتاب‌سنج روی محور وسیله نقلیه، اندازه‌گیری شتاب در حین حرکت صورت می‌گیرد و نیازی به توقف وسیله نقلیه روی پل ندارد. در اغلب روش‌ها، فرض بر این است که نیروی تحریک به صورت نویز سفید باشد. اما در این روش، خصوصیات نیروی تحریک در نظر گرفته نمی‌شود، که این مورد از دیگر مزایای روش می‌باشد. از آنجا که وجود پروفیل سطح جاده باعث می‌شود شناسایی پارامترهای مودال دشوار گردد، در این مقاله از تفاضل سیگنال شتاب از دو محور مشابه برای حذف اثر پروفیل سطح استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی به روش المان محدود، پل با حضور پروفیل سطح و سه وسیله نقلیه به صورت سیستم‌های دو درجه آزادی جرم-فنر-دمپر مدل شده‌اند. با حل هم‌زمان مدل پل-وسيله نقلیه و سپس حذف اثر پروفیل سطح، شناسایی شکل مود پل میسر می‌گردد. سپس، مسأله برهم‌کنش پل-وسيله نقلیه با در نظر گرفتن آسیب در پل، مجدداً حل شده و مکان‌یابی آسیب با استفاده از شاخص تغییر انحنای شکل مود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی عددی دلالت بر توانایی روش پیشنهادی در حضور نویز اندازه‌گیری دارد.

واژه‌های کلیدی: پایش سلامت پل، مکان‌یابی آسیب، نسبت انتقال‌پذیری، انحنای شکل مود، پروفیل سطح جاده

### ۱. مقدمه

است. پل‌ها به عنوان یکی از انواع ابرسازه‌های موجود، نقش بسیار مهمی در حمل و نقل ایفا می‌کنند و نیاز مبرمی به پایش سلامت دارند. تغییر در حجم بار عبوری در سال‌های اخیر و نیز زوال تدریجی، باعث ایجاد

در سال‌های اخیر، شناسایی آسیب در سازه به کمک پارامترهای مودال، موضوع مورد علاقه محققان بوده

و همکاران توانستند پارامترهای مودال پل را از پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه عبوری استخراج نمایند. در این روش، حسگر روی وسیله نقلیه نصب می‌شود و هیچگونه تجهیزات دیگری روی پل نصب نمی‌گردد. لین و یانگ (۲۰۰۵) نیز با عبور دادن وسیله نقلیه مجهز به حسگر روی پلی در تایوان مؤید امکان‌پذیر بودن این روش در عمل شده‌اند. روش غیرمستقیم در مقایسه با روش‌های مستقیم در استخراج فرکانس طبیعی پل، از مزایای بسیاری برخوردار است، از قبیل عدم صرف منابع مادی و انسانی زیاد، سهولت و بهره‌وری<sup>۳</sup>.

تحقیق پیرامون شناسایی فرکانس‌های طبیعی پل از سیگنال شتاب وسیله‌نقلیه عبوری به مراتب بیشتر از شناسایی شکل مودهای پل انجام شده است. اما تخمین شکل مودهای پل از آن جهت حائز اهمیت است که به موجب حضور آسیب، ناپیوستگی در شکل مود پل ایجاد می‌گردد که می‌تواند بنا به شرایط، شامل ناپیوستگی شیب و یا انحنای شکل مود باشد (پاندی و همکاران، ۱۹۹۱؛ ژو و لا، ۲۰۰۶).

از طرفی، در نظر گرفتن پروفیل سطح جاده در روش‌های غیرمستقیم مانعی بزرگ محسوب می‌شود. چرا که در طیف تبدیل فوریه، قله‌های فرکانسی وسیله نقلیه را نسبت به قله‌های فرکانسی پل بزرگتر نشان می‌دهد و باعث دشوار شدن شناسایی فرکانس‌های پل، ضراب میرایی و شکل مودها می‌گردد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲a و ۲۰۱۴). لذا، هرگونه روش پایش وضعیت و یا روش‌های تشخیص آسیب مبتنی بر پارامترهای ارتعاشی مذکور به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت اثر پروفیل سطح جاده قرار می‌گیرد. اولین روش برای مرتفع نمودن این مشکل، استفاده از سایر رفت‌وآمدها به منظور افزایش تأثیر متقابل پل بر پاسخ وسیله نقلیه می‌باشد (یانگ و چانگ، ۲۰۰۹؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ملک‌جعفریان و ابراین، ۲۰۱۴a و ۲۰۱۴b). متأسفانه، برای پل‌های دهانه

نقایصی در سازه این پل‌ها گردیده‌است (فوجینو و سیرینگورینگو، ۲۰۱۱). ترمیم و افزایش عمر این سازه‌ها مشکلات مهم حفاظتی و نگهداری را افزایش می‌دهند. در گذشته، نگهداری پل‌ها صرفاً به صورت بازرسی بصری انجام می‌گرفته که اصولاً از دقت خوبی برخوردار نبوده و تنها آسیب‌های قابل رؤیت را آشکار می‌نموده است. بنابراین، پل‌های ناقص از نظر سازه‌ای، به‌صورت کشف نشده باقی می‌مانند (پاکراشی و همکاران، ۲۰۱۱؛ دیویس و همکاران، ۲۰۱۳). در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از ریزش پل‌ها گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به ریزش پلی در جنوای ایتالیا در سال ۲۰۱۸ اشاره نمود که باعث کشته و زخمی شدن ده‌ها نفر گردیده است.

پایش ابرسازه‌ها با استفاده از پاسخ ارتعاشی، یکی از روش‌های تشخیص خودکار رفتارهای غیرعادی سازه می‌باشد که امروزه توجه خاصی را به خود معطوف کرده است. وانگ و چان (۲۰۰۹) در تحقیق خود پیرامون روش‌های شناسایی آسیب در پل بر اساس ارتعاشات، اظهار داشته‌اند که هر یک از تکنیک‌های شناسایی آسیب در پل محدودیت‌هایی دارند و نمی‌توان صرفاً روشی جامع را برای شناسایی آسیب بر پایه ارتعاشات معرفی نمود. آن‌ها متذکر شده‌اند که روش‌های آماری و تکنیک‌های نوین پردازش سیگنال نیز باید در پایش سلامت پل مورد استفاده قرار گیرند. روش‌های پایش سلامت سازه پل از قبیل شناسایی آسیب، ارزیابی ظرفیت سازه‌ای<sup>۱</sup> و تخمین عمر باقیمانده سازه<sup>۲</sup> نیز از مواردی بوده‌اند که توسط سنو و همکاران (۲۰۱۵) به‌طور مختصر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

روش سنتی برای پایش سلامت پل مبتنی بر ارتعاشات، روش مستقیم<sup>۳</sup> می‌باشد که در آن تعداد زیادی حسگر<sup>۴</sup> روی پل نصب می‌گردد و با توجه به مکان و نوع پل، می‌تواند پُر هزینه و زمان‌بر باشد. در سال ۲۰۰۴، یانگ

3- Direct  
4- Sensor  
5- Efficiency

۱- Structural capacity evaluation  
2- Remaining service life

از تخمین شکل مودهای آن با استفاده از پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه متحرک بهره بردند. هنگامی که نوبت اندازه‌گیری بزرگتر از ۱٪ در نظر گرفته شود، این روش نیازمند اندازه‌گیری‌های بی‌شماری می‌گردد که یکی از موانع برای کاربردهای عملی این روش به‌شمار می‌آید.

ملک‌جعفریان و اُبراین (b ۲۰۱۴)، روش تجزیه پاسخ فرکانسی را بر سیگنال کوتاه شده اعمال و فرآیند میزان‌سازی مجدد را بر بردارهای شکل مود موضعی اجرا کرده‌اند تا شکل مودهای کلی حاصل آید. اگر نوبت و سرعت وسیله نقلیه کم باشد، شکل مودها می‌تواند با دقت قابل قبولی به‌دست آید.

به منظور شناسایی غیرمستقیم آسیب در پل، نسبت انتقال‌پذیری توسط کُنگ و همکاران (۲۰۱۴) به‌کار گمارده شده است. اما قابل ذکر است که به منظور داده‌برداری، هر دو وسیله نقلیه و یا حداقل یکی از آن‌ها باید روی پل متوقف گردد.

هی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تبدیل هیلبرت، اولین شکل مود پل را استخراج نمودند و انحنای شکل مود موضعی<sup>۳</sup> را به عنوان شاخصی برای شناسایی آسیب مورد استفاده قرار دادند که از توانایی مناسبی برای غلبه بر نوبت برخورداری است. آن‌ها همچنین روشی دیگر بر اساس ویژگی تحمل بار را برای شناسایی شکل مودهای نرمال نسبت به جرم مورد استفاده قرار دادند. اگرچه شکل مودهایی با وضوح بالا در این روش حاصل آمده، اما سفتی وسیله نقلیه بی‌نهایت فرض شده و از فرض ساکن بودن وسیله نقلیه روی پل در حین داده‌برداری بهره گرفته است. در این حین، الگوریتمی جدید به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل توسط ملک‌جعفریان و اُبراین (۲۰۱۷) ارائه شده است. در این روش، انرژی مورد نیاز برای به ارتعاش واداشتن سیستم توسط تحریک خارجی به پل فراهم شده است.

اخیراً، یانگ و همکاران (۲۰۱۸) مروری جامع بر

کوچک که احتمال حضور هم‌زمان چندین وسیله نقلیه بر آنها کم است، این فرض مناسبی نمی‌باشد. در این بین، روش‌های دیگر مبتنی بر تفاضل سیگنال نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یانگ و همکاران (b ۲۰۱۲) ایده‌ای نو در استفاده از دو وسیله نقلیه متصل به هم برای حذف و یا کاهش اثر پروفیل جاده ارائه داده‌اند. تفاضل طیف شتاب دو محور متصل به هم که در سرعت ۲ m/s حاصل آمده به‌عنوان طیف باقیمانده معرفی شده است. قله‌های فرکانسی پل، به‌خصوص برای حالتی که دو محور مشابه مورد استفاده قرار گیرند، بهبود یافته‌اند.

معمولاً، برای تعیین موقعیت آسیب در سازه با دقت مناسب نیاز است تا علاوه بر فرکانس طبیعی، شکل مودهای آن نیز شناسایی گردد. شکل مود در مقایسه با فرکانس طبیعی به عیوب موضعی حساس‌تر است و به اثرات محیطی از قبیل دما نیز حساسیت کمتری دارد. در عین حال، از ملزومات شناسایی شکل مود در روش‌های مستقیم می‌توان به تعداد زیاد حسگر اشاره نمود که حساسیت بیشتر به نوبت در مقایسه با فرکانس طبیعی نیز به آن اضافه می‌شود (فرار و جیمز، ۱۹۹۷).

ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از امپدانس نقطه‌ای نشان دادند که اندازه طیف به‌دست آمده با مربع شکل مود<sup>۱</sup> متناسب است و می‌تواند برای تشخیص آسیب به‌کار رود. این مقاله (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۲) به عنوان اولین کاربرد روش‌های غیرمستقیم برای شناسایی مشخصه‌های مرتبط با شکل مود پل به حساب می‌آید.

یانگ و همکاران (۲۰۱۴) از مقدار اندازه‌های آنی در تبدیل هیلبرت<sup>۲</sup> در باندی خاص بهره گرفته و نشان دادند که دامنه‌ی مؤلفه پاسخ فرکانسی پل همان شکل مود پل می‌باشد. تأثیر نوبت بر این روش بررسی نشده است و آزمایش‌های عملی برای تأیید یافته‌هایشان مورد نیاز می‌باشد.

اوشیما و همکاران (۲۰۱۴) برای پایش آسیب در پل،

### 3- Regional mode shape curvature

### ۱- Mode Shape Square

### ۲- Hilbert Transform

با استفاده از تقسیم‌بندی سیگنال شتاب به بازه‌های زمانی کوچک، داده‌برداری بدون توقف وسیله نقلیه فراهم می‌آید.

در شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدود، یک پل دوسرهمفصل به صورت تیر اوایلر برنولی و سه وسیله نقلیه به صورت سه سیستم دو درجه آزادی جرم- فنر- دمپر مدل‌سازی شده‌اند. برای دستیابی به شتاب وسایل نقلیه نیاز است تا مدل اجزای محدود برهم‌کنش پل با وسایل نقلیه به طور هم‌زمان حل گردد. شتاب وسایل نقلیه به بازه‌های مساوی تقسیم شده و نسبت انتقال‌پذیری برای آن‌ها محاسبه و با اعمال تجزیه مقدار تکین بر ماتریس‌های انتقال‌پذیری، شکل مود پل حاصل آمده است. سپس، با در نظر گرفتن یک آسیب در پل و انجام مجدد مراحل فوق، شکل مود پل برای این حالت تخمین زده شده است. در این مرحله، با کمک شاخص تغییر انحنای شکل مود، مکان‌یابی آسیب انجام پذیرفته است. در انتها، تفاضل سیگنال از دو محور مشابه متوالی برای مکان‌یابی آسیب در حضور پروفیل سطح جاده به کار گمارده شده و کارآمدی روش پیشنهادی نیز در حضور نویز اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. تئوری

### ۲-۱. مدل‌سازی برهم‌کنش وسیله نقلیه با پل

در این بخش، برهم‌کنش وسیله نقلیه با پل توسط روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده است (کیناهان و همکاران، ۲۰۱۳). دستگاه معادلات برهم‌کنش وسیله نقلیه با پل به صورت یک دستگاه معادلات به هم وابسته در نظر گرفته شده است که حل آن در هر گام زمانی مقدور می‌باشد. سه وسیله نقلیه به صورت سه سیستم دو درجه آزادی جرم- فنر- دمپر با فواصل یکسان مدل شده‌اند (شکل ۱).

شناسایی غیرمستقیم پارامترهای مودال و تشخیص آسیب در پل از وسیله نقلیه عبوری ارائه داده و متذکر شده‌اند که باید بررسی‌های بیشتری پیرامون استفاده از مدل چند درجه آزادی برای وسیله نقلیه در شبیه‌سازی عددی، تست آزمایشگاهی و تست میدانی انجام پذیرد.

تحقیق ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) به‌عنوان اولین مطالعه در شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل، مبتنی بر به‌کار گرفتن وسیله نقلیه محرک و اندازه‌گیری نیروی تحریک می‌باشد که ممکن است در حالت واقعی قابل اجرا نباشد. همچنین، روش ارائه شده توسط یانگ و همکاران (۲۰۱۴) برای استخراج شکل مود، نیاز به بررسی در حضور نویز دارد. از طرف دیگر، روش‌های ارائه شده توسط اوشیما و همکاران (۲۰۱۴) و ملک-جعفریان و اُبراین (۲۰۱۴b) نیز حاکی از آن است که این روش‌ها حساسیت بالایی به نویز دارند که در اندازه‌گیری‌های واقعی نمی‌توانند چندان موفقیت‌آمیز ایفای نقش نمایند. اگرچه انتقال‌پذیری به منظور شناسایی آسیب در پل توسط کُنگ و همکاران (۲۰۱۴) مورد استفاده قرار گرفته است، اما در تحقیق ایشان لازم است که حداقل یکی از وسایل نقلیه در حین داده‌برداری متوقف باشد. علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته برای غلبه بر اثر پروفیل جاده و نویز در اندازه‌گیری‌ها، کماکان این موارد به‌عنوان مشکلاتی مهم برای روش‌های غیرمستقیم می‌باشند که نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

در اغلب روش‌های شناسایی آسیب، فرض بر این است که تحریک به صورت نویز سفید باشد. حال آن که در واقعیت، تحریک ندرتاً به صورت نویز سفید است. لذا، استفاده از روشی مانند انتقال‌پذیری که نیاز به دانستن نوع تحریک ندارد، می‌تواند راهگشای شناسایی غیرمستقیم آسیب در کاربردهای واقعی باشد. بنابراین، در این مقاله، روشی نوین بر مبنای انتقال‌پذیری به منظور مکان‌یابی آسیب در پل با استفاده از پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه عبوری ارائه می‌گردد. پل به همراه پروفیل سطح و سیگنال‌های شتاب آغشته به نویز در نظر گرفته می‌شوند.

می‌توان روابط (۱) تا (۶) را برای رسیدن به رابطه (۷) تلفیق نمود:

$$[M_v]\{\ddot{Y}_v\} + [C_v]\{\dot{Y}_v\} + [K_v]\{Y_v\} = \{f_{int}\} \quad (۷)$$

که  $\{f_{int}\}$  نمایش‌دهنده بردار نیروی برهم‌کنش وسیله نقلیه با پل،  $\{Y_v\}$ ،  $\{\dot{Y}_v\}$  و  $\{\ddot{Y}_v\}$  به ترتیب بردار جابجایی، سرعت و شتاب وسیله نقلیه و  $[M_v]$ ،  $[C_v]$  و  $[K_v]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی وسیله نقلیه می‌باشند.

پل به طول  $L$  به صورت یک تیر دوسرهمفصل اوپلر-برنولی در نظر گرفته شده که هر المان آن دارای دو گره دو درجه آزادی است. جرم واحد طول، مدول الاستیک و ممان اینرسی مقطع پل ثابت فرض می‌شود. بنابراین، رابطه (۸) می‌تواند به عنوان معادله حرکت پل بیان شود:

$$[M_b]\{\ddot{Y}_b\} + [C_b]\{\dot{Y}_b\} + [K_b]\{Y_b\} = \{f_{int}\} \quad (۸)$$

که ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی پل به ترتیب با نماد  $[M_b]$ ،  $[C_b]$  و  $[K_b]$  نمایش داده شده‌اند و  $\{Y_b\}$ ،  $\{\dot{Y}_b\}$  و  $\{\ddot{Y}_b\}$  به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی می‌باشند. ماتریس میرایی پل می‌تواند به صورت متناسب فرض شود که از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$[C_b] = \alpha[M_b] + \beta[K_b] \quad (۹)$$

که ثوابت  $\alpha$  و  $\beta$  از رابطه (۱۰) قابل محاسبه می‌باشند (ملک‌جعفریان و ابرین، ۲۰۱۴):

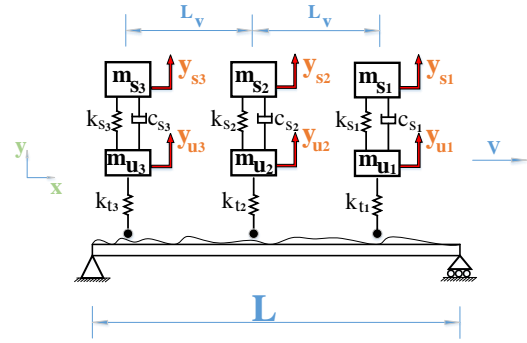
$$\alpha = \frac{2\zeta\omega_1\omega_2}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad , \quad \beta = \frac{2\zeta}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (۱۰)$$

در رابطه اخیر،  $\zeta$  نشان‌دهنده ضریب میرایی پل است. همچنین، اولین و دومین فرکانس طبیعی پل به ترتیب با  $\omega_1$  و  $\omega_2$  تعریف شده است.

با ترکیب معادلات (۷) و (۸)، معادله کوپله برهم‌کنش وسیله نقلیه با پل به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی می‌گردد:

$$[M_T]\{\ddot{Y}_T\} + [C_T]\{\dot{Y}_T\} + [K_T]\{Y_T\} = \{F_T\} \quad (۱۱)$$

که  $[M_T]$ ،  $[C_T]$  و  $[K_T]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی کل سیستم برهم‌کنش و بردار مربوط به نیروی آن است. بردار جابجایی،  $\{Y_T\}$  نیز به صورت زیر تعریف شده است:



شکل ۱. مدل برهم‌کنش وسیله نقلیه با پل

در شکل ۱، اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهنده اولین، دومین و سومین وسیله نقلیه می‌باشند. پارامترهای  $m_s$ ،  $m_u$ ،  $k_s$ ،  $k_t$  و  $c_s$  به ترتیب به عنوان جرم بدنه، جرم اکسل، سفتی سیستم تعلیق، سفتی لاستیک و میرایی سیستم تعلیق وسیله نقلیه در نظر گرفته می‌شوند.  $y_s$  به عنوان جابجایی عمودی بدنه و  $y_u$  به عنوان جابجایی عمودی اکسل تعریف شده است. سرعت وسیله نقلیه مقدار ثابت  $v$  و فاصله هر دو وسیله نقلیه از هم  $L_v$  می‌باشد. با توجه به شکل ۱، معادلات برهم‌کنش پل با وسیله نقلیه به روش تعادل نیرو به دست می‌آیند که در روابط (۱) تا (۶) آورده شده‌اند:

$$m_{s1}\ddot{y}_{s1} + c_{s1}(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_{u1}) + k_{s1}(y_{s1} - y_{u1}) = 0 \quad (۱)$$

$$m_{u1}\ddot{y}_{u1} - c_{s1}(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_{u1}) - k_{s1}(y_{s1} - y_{u1}) + k_{t1}(y_{u1} - y_b|_{x=vt+2L_v} - r_b|_{x=vt+2L_v}) = 0 \quad (۲)$$

$$m_{s2}\ddot{y}_{s2} + c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) + k_{s2}(y_{s2} - y_{u2}) = 0 \quad (۳)$$

$$m_{u2}\ddot{y}_{u2} - c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) - k_{s2}(y_{s2} - y_{u2}) + k_{t2}(y_{u2} - y_b|_{x=vt+L_v} - r_b|_{x=vt+L_v}) = 0 \quad (۴)$$

$$m_{s3}\ddot{y}_{s3} + c_{s3}(\dot{y}_{s3} - \dot{y}_{u3}) + k_{s3}(y_{s3} - y_{u3}) = 0 \quad (۵)$$

$$m_{u3}\ddot{y}_{u3} - c_{s3}(\dot{y}_{s3} - \dot{y}_{u3}) - k_{s3}(y_{s3} - y_{u3}) + k_{t3}(y_{u3} - y_b|_{x=vt} - r_b|_{x=vt}) = 0 \quad (۶)$$

که  $r_b$  جابجایی به واسطه حضور پروفیل سطح می‌باشد.

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} T_{x_o x_j}^k(i\omega) = \lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} \frac{S_{x_o x_k}(i\omega)}{S_{x_j x_k}(i\omega)} = \frac{\psi_{o_l}^* \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \hat{H}_{z_l f_r}^*(i\omega_l) S_{f_r f_s}(i\omega_l) \hat{H}_{z_l f_s}(i\omega_l) \psi_{k_l}}{\psi_{j_l}^* \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \hat{H}_{z_l f_r}^*(i\omega_l) S_{f_r f_s}(i\omega_l) \hat{H}_{z_l f_s}(i\omega_l) \psi_{k_l}} \quad (15)$$

که  $\psi_{kl}$  درجه آزادی  $k$  شکل مود  $l$  ام و  $\omega_l$  فرکانس طبیعی  $l$  ام می باشد.

با تعریف نقطه ای دیگر مانند  $z$  به عنوان مرجع، نسبت انتقال پذیری بازنویسی می گردد که به سمت مقادیری مشابه میل می نماید (رابطه ۱۶) (آروخو و لیر، ۲۰۱۴):

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} T_{x_o x_j}^z(i\omega) = \lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} \frac{S_{x_o x_z}(i\omega)}{S_{x_j x_z}(i\omega)} = \frac{\psi_{o_l}^*}{\psi_{j_l}^*} \quad (16)$$

اکنون با تغییر نقاط  $o$ ، ماتریس انتقال پذیری به صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می شود:

$$\begin{bmatrix} T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{x_1 x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_1 x_j}^{z_2}(i\omega) \\ T_{x_2 x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_2 x_j}^{z_2}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (17)$$

با توجه به دو رابطه اخیر و با نزدیک شدن به قطب های سیستم، رابطه (۱۸) به دست می آید:

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} \begin{bmatrix} T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{j_l}^* & \psi_{j_l}^* \\ \psi_{j_l}^* & \psi_{j_l}^* \\ \psi_{j_l}^* & \psi_{j_l}^* \\ \psi_{j_l}^* & \psi_{j_l}^* \end{bmatrix} \quad \text{where } \frac{\psi_{o_l}^*}{\psi_{j_l}^*} = 1 \text{ if } x_{o_i} = x_j \quad (18)$$

با توجه به مشابه بودن ستون های ماتریس رابطه (۱۸)، مرتبه این ماتریس برابر یک می گردد. با اعمال تجزیه مقدار تکین<sup>۳</sup>، دومین مقدار تکین برای ماتریس مذکور به سمت صفر میل خواهد کرد. بنابراین، می توان از معکوس دومین مقدار تکین به منظور تعیین فرکانس طبیعی سیستم بهره برد (آروخو و لیر، ۲۰۱۴).

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (19) \\ & = [U^j(i\omega)]_{2 \times 2} [\Sigma^j(i\omega)]_{2 \times 2} [V^j(i\omega)]_{2 \times 2}^* \\ & \text{راست ماتریس } T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega) \text{ و } * \text{ مزدوج مختلط می باشد.} \\ & \text{مقادیر تکین ماتریس } T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega) \text{ به صورت قطری در} \\ & \text{ماتریس } [\Sigma^j(i\omega)] \text{ طوری چیده شده اند که } \sigma_1(i\omega) \geq \end{aligned}$$

$$\{Y_T\} = \begin{Bmatrix} Y_T \\ Y_b \end{Bmatrix} \quad (12)$$

روش انتگرال گیری ویلسون تتا به منظور حصول پاسخ معادله (۱۲) مورد استفاده قرار می گیرد (تدسکو و همکاران، ۱۹۹۹). مقدار  $\theta = 1.420815$  به عنوان مقدار بهینه برای پایداری غیرمشروط در روش ویلسون تتا انتخاب و کلیه شرایط اولیه نیز صفر در نظر گرفته می شود.

## ۲.۲. شناسایی پارامترهای مودال به روش انتقال پذیری

در فرایندهای اتفاقی، چگالی طیف توان انتقال پذیری<sup>۱</sup> به صورت نسبت چگالی طیف توان<sup>۲</sup> نقاط  $o$  و  $z$  نسبت به نقطه مرجع  $k$ ، تعریف می گردد (رابطه ۱۳) (آروخو و لیر، ۲۰۱۴):

$$T_{x_o x_j}^k(i\omega) = \frac{S_{x_o x_k}(i\omega)}{S_{x_j x_k}(i\omega)} \quad (13)$$

که  $i$  عدد موهومی  $\sqrt{-1}$  و  $S_{x_o x_k}$  چگالی طیف توان خروجی های  $x_o$  و  $x_k$  و  $S_{x_j x_k}$  چگالی طیف توان خروجی های  $x_j$  و  $x_k$  می باشد. با استفاده از رابطه بین چگالی طیف توان خروجی- ورودی، رابطه (۱۳) به صورت رابطه (۱۴) قابل بازنویسی است:

$$\begin{aligned} T_{x_o x_j}^k(i\omega) & = \frac{\sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N H_{x_o f_r}^*(i\omega) H_{x_k f_s}(i\omega) S_{f_r f_s}(i\omega)}{\sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N H_{x_j f_r}^*(i\omega) H_{x_k f_s}(i\omega) S_{f_r f_s}(i\omega)} \quad (14) \end{aligned}$$

که  $H^*$  و  $H$  توابع تبدیل سیستم و \* معرف مزدوج مختلط است.

با فرض جدا بودن مودهای ارتعاشی و کوچک بودن صورت رابطه (۱۹) تعریف می گردد. هر یک از مودهای سیستم، فرکانس متناظر با مود مذکور به عنوان فرکانس غالب در پاسخ ارتعاشی سازه قلمداد شده و سهم سایر مودهای ارتعاشی صرف نظر می شود (رابطه ۱۵) (آروخو و لیر، ۲۰۱۴):

تکین در ماتریس  $[U(i\omega)]$  از رابطه (۱۹) در نزدیکی فرکانس طبیعی، با شکل مود سیستم متناسب می‌باشد.

### ۲-۳. محاسبه شکل مود به روش زمان کوتاه

از آنجا که در روش فوق‌الذکر، سیگنال دو عدد شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب پل استفاده می‌شود، امکان استفاده مستقیم از رابطه (۲۲) برای محاسبه شکل مود وجود ندارد. لذا، در این بخش، روشی به کار گرفته می‌شود که با تقسیم‌بندی سیگنال شتاب به بازه‌های زمانی کوتاه، امکان محاسبه شکل مود فراهم آید. ایده استخراج شکل مودهای پل به روش زمان کوتاه، اولین بار توسط ملک‌جعفریان و ابراین (۲۰۱۴b) ارائه گردید. برای این امر، سیگنال شتاب دو محور متوالی به بازه‌های زمان کوتاه تقسیم می‌شود. فاصله بین دو محور برای تقسیم‌بندی سیگنال شتاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماتریس شتاب دو محور متوالی به صورت رابطه (۲۳) قابل تعریف است:

$$\ddot{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_{i,2} \\ \ddot{y}_{i+1,1} \end{bmatrix} \quad i = 1:N-1, \quad (23)$$

که  $\ddot{y}_{i,2}$  و  $\ddot{y}_{i+1,1}$  به ترتیب شتاب اولین و دومین محور می‌باشند که از قسمت  $(i+1)$  ام و  $i$ ام در حال عبور هستند. بردار شکل مود موضعی مربوط به قسمت  $(i+1)$  (1) ام و  $i$  ام با اعمال روش انتقال‌پذیری بر ماتریس شتاب،  $\ddot{Y}$ ، از رابطه (۲۳) قابل محاسبه هستند.

شکل ۲، روند حصول بردار شکل مود موضعی به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری- زمان کوتاه از ماتریس شتاب  $i$  ام را نمایش می‌دهد. بردار شکل مود موضعی به صورت رابطه (۲۴) تعریف شده است:

$$\psi = \begin{Bmatrix} \psi_{i,2} \\ \psi_{i+1,1} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

با عبور وسیله نقلیه از پل، بردارهای شکل مود موضعی برای کلیه قسمت‌های پل به دست می‌آیند. با توجه به اینکه در هر لحظه تنها دو شکل مود موضعی به دست می‌آید، لذا باید نوعی فرایند میزان‌سازی روی

$\sigma_2(i\omega)$  برای هر ماتریس  $T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)$  مقادیر تکین به صورت  $\Sigma(i\omega)^j = [\sigma(i\omega)_1^j \quad \sigma(i\omega)_2^j]$  نمایش داده می‌شود.

بنابراین، شناسایی فرکانس‌های طبیعی با استفاده از تجزیه مقدار تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال‌پذیری (PSDTM-SVD) مقذور است (آروخو و لیر، ۲۰۱۴).  $\pi(i\omega)$  به عنوان معکوس دومین مقدار تکین در رابطه (۲۰) تعریف شده است:

$$\pi(i\omega) = \frac{1}{\sigma(i\omega)_2} \quad (20)$$

از نمودار  $\pi(i\omega)$  بر حسب  $\omega$  برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم بدین صورت استفاده می‌شود که قله‌های این نمودار همان فرکانس‌های طبیعی هستند.

می‌توان نشان داد که بردارهای  $[U(i\omega)]$  همان بردارهای ویژه ماتریس  $[T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]^T [T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]$  می‌باشند که ضربی از شکل مودهای سیستم به‌شمار می‌آیند. مسأله مقدار ویژه برای ماتریس  $[T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]^T [T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]$  هنگامی که  $i\omega = i\omega_l$  باشد به فرم رابطه (۲۱) نمایش داده می‌شود (آروخو و لیر، ۲۰۱۴):

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} \left[ [T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]^T [T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)] \right] - \lambda_p(i\omega)I \Big\{ U(i\omega) \Big\}_p \quad (21)$$

$$\text{الف)}$$

$$\begin{bmatrix} 2 \frac{\psi_{11}^2}{\psi_{j1}^2} & 2 \frac{\psi_{11}\psi_{21}}{\psi_{j1}^2} \\ 2 \frac{\psi_{21}\psi_{11}}{\psi_{j1}^2} & 2 \frac{\psi_{21}^2}{\psi_{j1}^2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\text{ب)}$$

$$- \lambda_p(i\omega_l) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U(i\omega_l)_1 \\ U(i\omega_l)_2 \end{Bmatrix}_p$$

از روابط (۲۱-الف) و (۲۱-ب)، اولین بردار ویژه ماتریس  $[T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]^T [T_{x_{o_i}x_j}^{z_i}(i\omega)]$  برای  $i\omega = i\omega_l$  به صورت رابطه (۲۲) حاصل می‌شود:

$$\{U\}_1 = \frac{1}{\sqrt{\psi_{11}^2 + \psi_{21}^2}} [\psi_{11} \quad \psi_{21}] \quad (22)$$

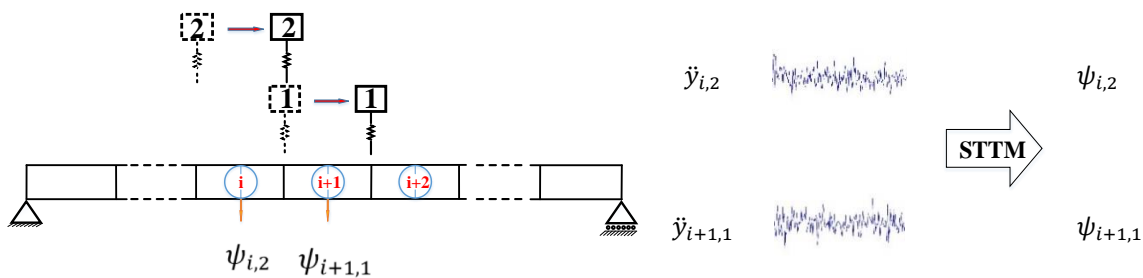
با توجه به رابطه اخیر، می‌توان دریافت که اولین بردار

میزان‌سازی و در نظر گرفتن شکل مود موضعی قسمت سوم  $(\psi_{3,1})$ ، شکل مود کلی قسمت سوم پل به صورت  $\psi_{3,1} \phi_2 / \psi_{2,2}$  قابل حصول است. به همین طریق، سایر شکل مودهای کلی از رابطه (۲۶) قابل محاسبه هستند:

$$\phi = \left\{ \phi_1 \quad \phi_2 \quad \psi_{3,1} \frac{\phi_2}{\psi_{2,2}} \quad \dots \quad \psi_{i+1,1} \frac{\phi_i}{\psi_{i,2}} \right\}^T \quad (26)$$

$$= 3:N - 1$$

در رابطه (۲۶)، شکل مود کلی مربوط به وسط قسمت  $i$ ام پل با  $\phi_i$  نمایش داده شده است. به نظر می‌رسد که افزایش تعداد تقسیمات پل باعث افزایش تعداد نقاط شکل مود گردد. اما با افزایش تعداد قسمت‌ها، اندازه هر کدام از سیگنال‌های شتاب کاهش می‌یابد که منجر به کاهش دقت در اندازه‌گیری انتقال‌پذیری می‌گردد.



شکل ۲. محاسبه شکل مود به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری زمان کوتاه بدون در نظر گرفتن پروفیل سطح جاده

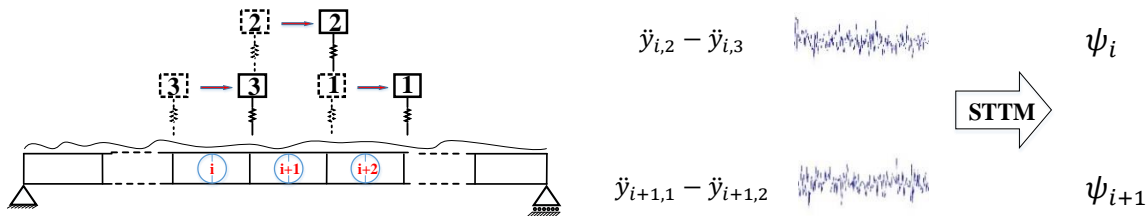
$$\ddot{X} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_{i,2} - \ddot{y}_{i,3} \\ \ddot{y}_{i+1,1} - \ddot{y}_{i+1,2} \end{bmatrix} \quad i = 1:N - 1 \quad (27)$$

که  $\ddot{y}_{i,2}$  و  $\ddot{y}_{i,3}$  به ترتیب شتاب دومین و سومین محور می‌باشند، هنگامی که از قسمت  $(i)$  ام در حال عبور هستند.  $\ddot{y}_{i+1,1}$  و  $\ddot{y}_{i+1,2}$  نیز به ترتیب شتاب دومین و اولین محور می‌باشند، هنگامی که از قسمت  $(i+1)$  ام عبور می‌کنند. بردار شکل مود موضعی مربوط به قسمت  $(i+1)$  ام و  $(i)$  ام با اعمال روش انتقال‌پذیری بر ماتریس شتاب،  $\ddot{X}$ ، قابل محاسبه هستند (رابطه ۲۷).

## ۲-۴. حذف اثر پروفیل سطح جاده

در این مقاله، به منظور حذف اثر پروفیل سطح جاده، از روش ارائه شده توسط یانگ و همکاران (۲۰۱۲b) مبتنی بر تفاضل طیف شتاب دو محور مشابه استفاده شده است. از آنجا که محورهای پیشین، بعد از مدت زمانی روی قسمت‌هایی از پل عبور می‌نمایند که از قبل محورهای جلویی از روی آن عبور کرده‌اند، لذا، با تفاضل این دو سیگنال می‌توان بخش مشابه هم را حذف نمود که به معنای حذف اثر پروفیل سطح می‌باشد (رابطه ۲۷):





شکل ۳. تفاضل سیگنال از محورهای متوالی به منظور حذف اثر پروفیل سطح جاده و محاسبه شکل مود به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری زمان کوتاه

در رابطه اخیر،  $\phi_i''^d$  و  $\phi_i''$  به ترتیب، مشتق دوم شکل مود سازه معیوب و سازه سالم در نقطه  $i$  می‌باشد. تقریب تفاضل مرکزی برای محاسبه مشتق دوم شکل مود (رابطه ۲۹) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\phi_i'' = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{h^2} \quad (29)$$

که  $h$  نشان‌دهنده فاصله بین نقاط اندازه‌گیری شکل مود است. شاخص شناسایی آسیب برای هر نقطه به صورت میانگین  $\Delta\phi_i''$  برای تمام مودها در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۳۰):

$$MSC_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta\phi_i'')_n \quad (30)$$

آسیب می‌تواند با رسم  $MSC_i$  بر حسب طول پل، مکان‌یابی گردد.

### ۳. شبیه‌سازی عددی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی عددی برای شنا سایی آسیب در پل با استفاده از روش پیشنهادی آورده شده است. مدل برهم‌کنش وسیله نقلیه-پل از بخش ۲-۱ به صورت سه محور مشابه با مشخصات ارتعاشی مندرج در جدول ۱ و پل به صورت اوپلر-برنولی با مشخصات مندرج در جدول ۲، سرعت وسیله نقلیه ۱/۵ متر بر ثانیه و بازه‌های زمانی به مقدار ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.

### ۲-۵. شناسایی آسیب با استفاده از انحنای

#### شکل مود

در این مقاله، مدل‌سازی ترک در پل مشابه تحقیق سینها و همکاران (۲۰۰۲) انجام شده است. در این مدل، کاهش سفتی در محدوده‌ی حضور ترک به گونه‌ای است که انعطاف‌پذیری در هر دو طرف ترک به صورت خطی از محل ترک تا قسمت سالم تغییر می‌کند. عمق تیر به منظور تعیین عمق ترک مورد استفاده قرار می‌گیرد که شدت ترک توسط عمق آن قابل محاسبه است.

طی این چند دهه، شاخص‌های گوناگونی برای شناسایی آسیب مطرح شده است (فن و کیانو، ۲۰۱۱). برخی از این شاخص‌ها از تغییرات شکل مود (شی و همکاران، ۲۰۰۰؛ حاجیلونتیادیس و همکاران، ۲۰۰۵؛ فن و کیانو، ۲۰۰۹) و برخی دیگر، از انحنای شکل مود (پانندی و همکاران، ۱۹۹۱؛ لی و همکاران، ۲۰۰۵) بهره می‌برند که حساسیت بیشتری به حضور آسیب دارد. در این تحقیق، از شاخص آسیب ارائه شده توسط پانندی و همکاران (۱۹۹۱) بهره گرفته شده است. تغییرات انحنای عنوان شاخص آسیب در رابطه (۲۸) تعریف شده است که اختلاف بین مشتق دوم شکل مود سازه سالم و سازه معیوب را نشان می‌دهد:

$$\Delta\phi_i'' = |\phi_i''^d - \phi_i''| \quad (28)$$

جدول ۱. مشخصات مدل یک چهارم خودرو

مقدار	نام‌گذاری	مشخصات
۱۷۳۰۰	$m_{s1}, m_{s2}$	جرم بدنه (kg)
۷۰۰	$m_{u1}, m_{u2}$	جرم محور (kg)
$۱۰^۵ \times ۴$	$k_{s1}, k_{s2}$	سفتی تعلیق (N/m)
$۱۰^۳ \times ۱۰$	$c_{s1}, c_{s2}$	میرایی تعلیق (N.s/m)
$۱/۱۰^۶ \times ۷۵$	$k_{t1}, k_{t2}$	سفتی لاستیک (N/m)

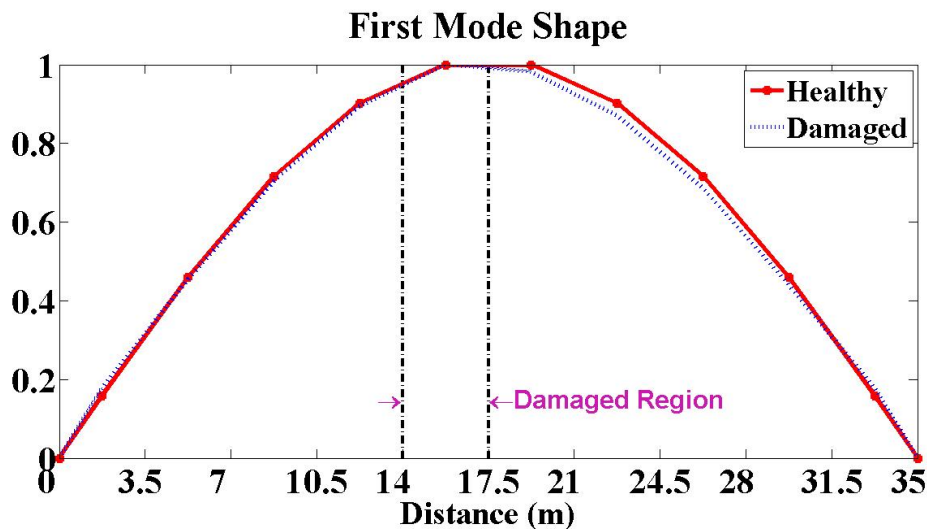
جدول ۲. مشخصات پل

مقدار	نام‌گذاری	مشخصات
۲۱۷۵۲	$\bar{m}$	جرم واحد طول (kg/m)
۳۵	$L$	طول (m)
۳۵۰۰۰	$E$	مدول الاستیک (MPa)
$۳/۴۱۶۲$	$I$	ممان دوم سطح مقطع ( $m^4$ )

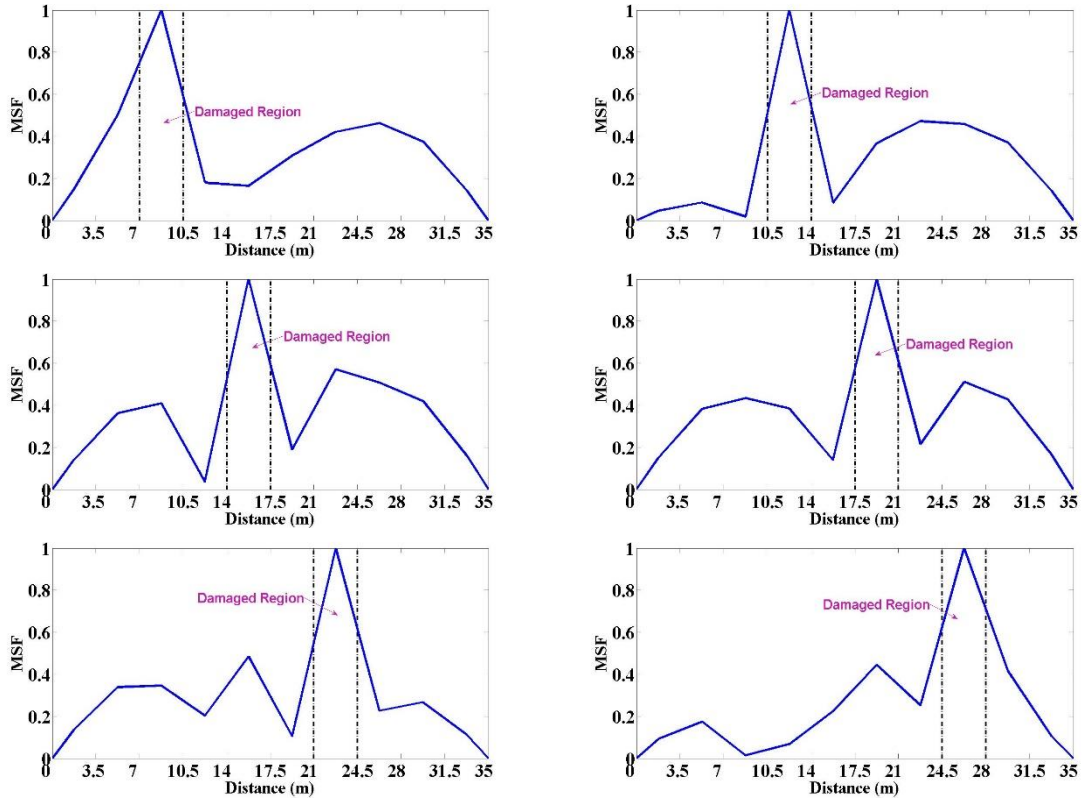
نقاط مربوط به وسط قسمتی از پل می‌باشد که دو محور متوالی از آن گذر کرده است (رابطه ۲۶).

برای نمونه، شکل مود برای تیر سالم و معیوب (ترک با شدت ۴۰٪ در المان ۵) در شکل ۴ نمایش داده شده است. به منظور مکان‌یابی ترک، شاخص آسیب از رابطه (۳۰) برای هر یک از مقادیر مختلف شدت ترک در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ترسیم شده و مکان آسیب با دقت قابل قبولی به دست آمده است.

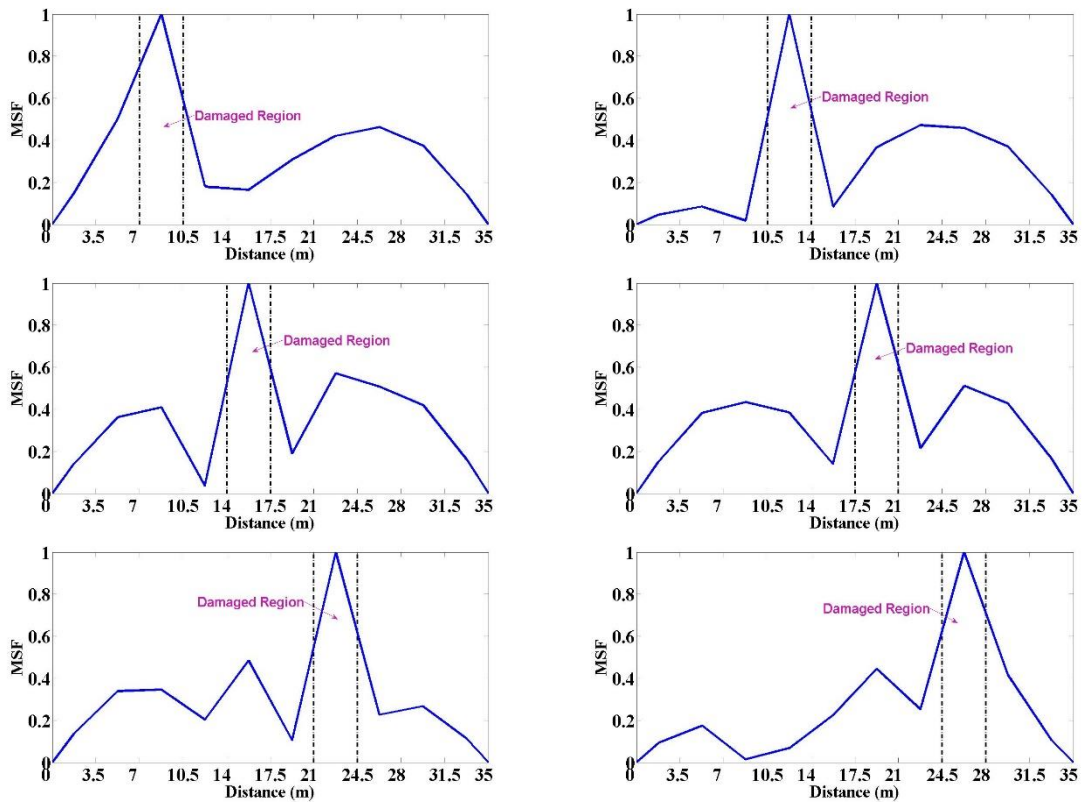
تعداد ۱۰ المان در مدل اجزای محدود برای تیر و مکان‌های مختلف برای ترک با سه شدت مختلف (۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد) و پروفیل سطح جاده به صورت پروفیل کلاس A (بسیار خوب) از استاندارد (استاندارد، ۱۹۹۵) در نظر گرفته شده است. روی محور وسیله نقلیه، یک عدد شتاب‌سنج، وظیفه ثبت داده‌ها را برعهده دارد. با توجه به مقدار فاصله هر محور از هم ( $L_v = 3.5 m$ )، تعداد ۱۰ نقطه برای شکل مود حاصل می‌گردد که هر یک از این



شکل ۴. شکل مود تیر سالم و معیوب با فرض ترک با شدت ۴۰٪ در المان ۵

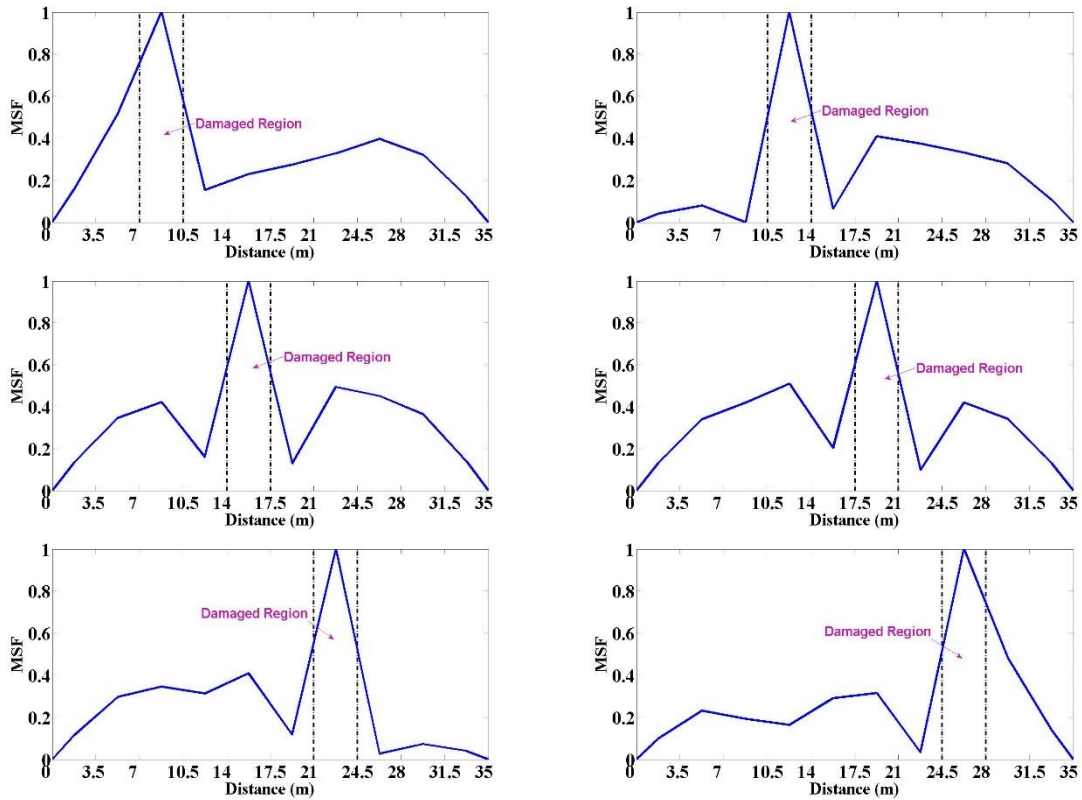


شکل ۵. مکان‌یابی ترک در المان‌های ۳ تا ۸ با فرض ترک با شدت ۴۰٪ در حضور پروفیل سطح جاده



شکل ۶. مکان‌یابی ترک در المان‌های ۳ تا ۸ با فرض ترک با شدت ۴۰٪ در حضور پروفیل سطح جاده

مکان‌یابی آسیب در پل در حضور پروفیل سطح جاده با استفاده از اندازه‌گیری ارتعاشات وسیله نقلیه عبوری



شکل ۷. مکان‌یابی ترک در المان‌های ۳ تا ۸ با فرض ترک با شدت ۶۰٪ در حضور پروفیل سطح جاده

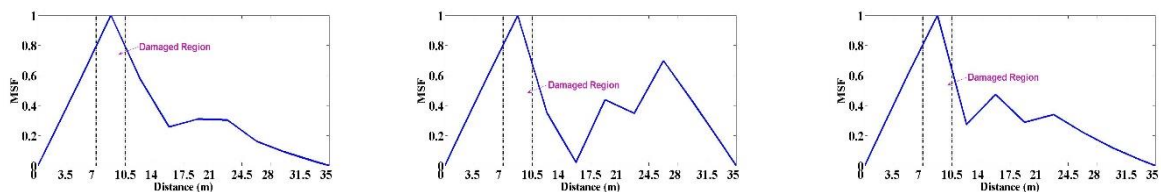
شدت نویز،  $N_{noise}$  بردار توزیع نرمال استاندارد با مقدار میانگین صفر و انحراف معیار واحد و  $\sigma(w_{calc})$  انحراف معیار سیگنال شتاب می‌باشد.

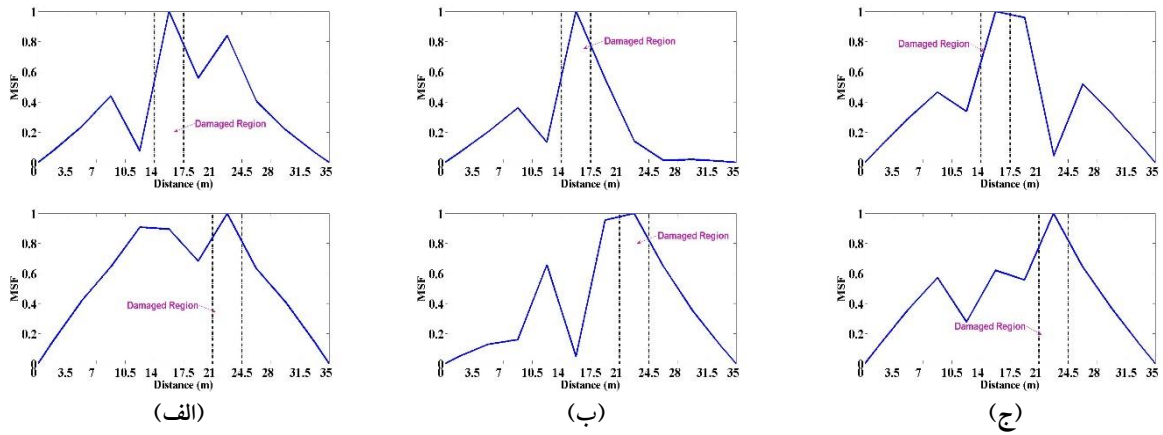
مکان‌یابی ترک برای المان‌های ۳، ۵ و ۷ به عنوان نمونه در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آورده شده است که قسمت‌های الف، ب و ج به ترتیب نشان‌دهنده ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نویز اندازه‌گیری می‌باشند. شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ گویای این مطلب می‌باشند که روش پیشنهادی مکان‌یابی آسیب برای مقادیر مختلف شدت ترک در حضور نویز تا ۱۵٪، از عملکرد مطلوبی برخوردار است.

از آنجا که وجود نویز به صورت اثرات نامطلوب محیطی و یا تداخلات سیستمی در اندازه‌گیری سیگنال به عنوان جزء لاینفک محسوب می‌شود، بررسی حساسیت به نویز در پایش سلامت سازه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق، نویز سفید گوسی با درصدهای مختلف مطابق رابطه (۳۱) به سیگنال شتاب اضافه گشته و مراحل شناسایی آسیب مجدداً انجام شده است.

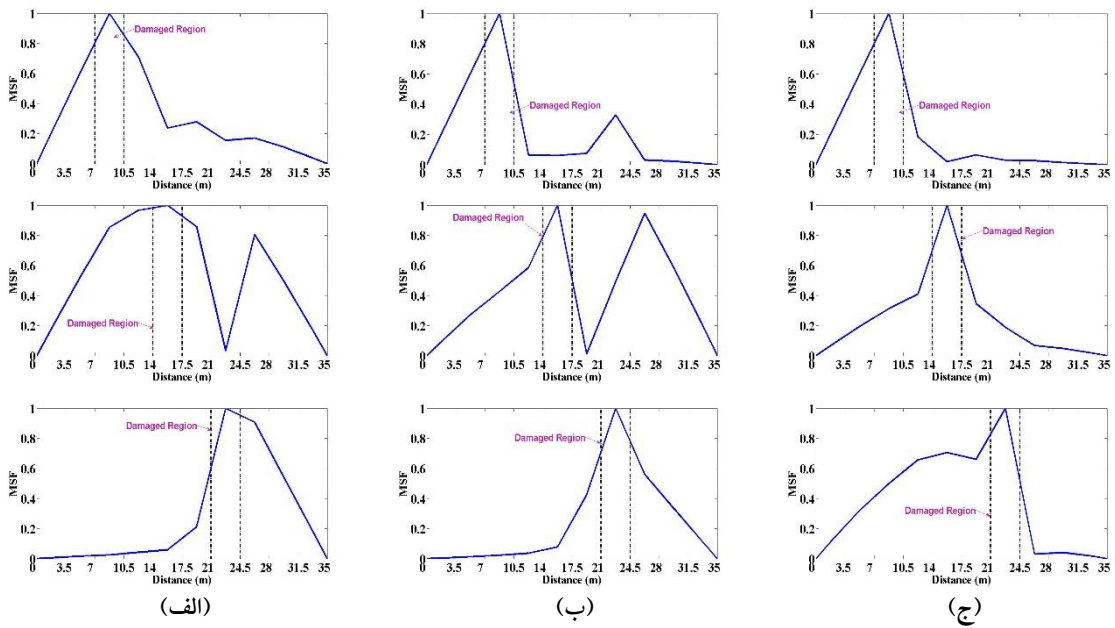
$$w = w_{calc} + E_p N_{noise} \sigma(w_{calc}) \quad (31)$$

در رابطه (۳۱)،  $w$  معرف سیگنال آغشته به نویز،  $E_p$

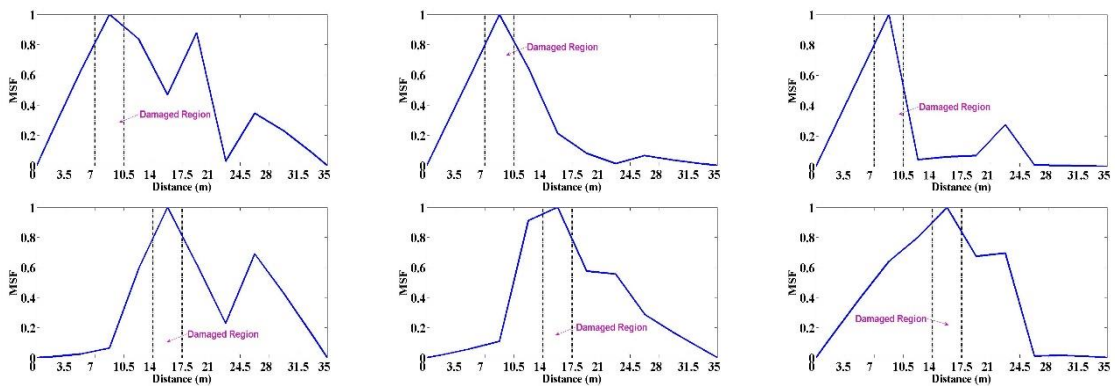




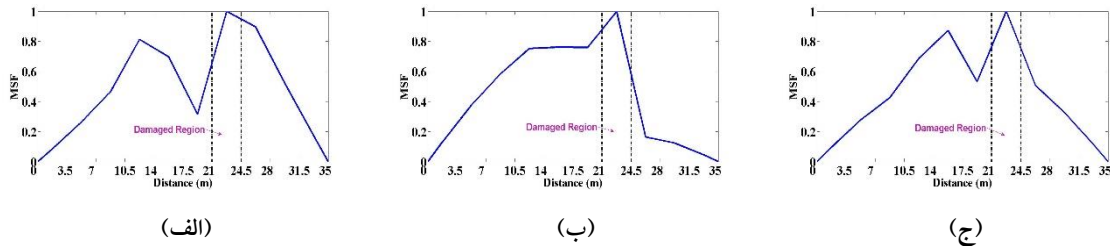
شکل ۸ مکان‌یابی ترک با شدت ۲۰٪ در المان‌های ۳، ۵ و ۷ در حضور پروفیل سطح جاده و با در نظر گرفتن: الف) ۵٪، ب) ۱۰٪ و ج) ۱۵٪ نویز در اندازه‌گیری



شکل ۹ مکان‌یابی ترک با شدت ۴۰٪ در المان‌های ۳، ۵ و ۷ در حضور پروفیل سطح جاده و با در نظر گرفتن: الف) ۵٪، ب) ۱۰٪ و ج) ۱۵٪ نویز در اندازه‌گیری



مکان‌یابی آسیب در پل در حضور پروفیل سطح جاده با استفاده از اندازه‌گیری ارتعاشات وسیله نقلیه عبوری



شکل ۱۰. مکان‌یابی ترک با شدت ۶۰٪ در المان‌های ۳، ۵ و ۷ در حضور پروفیل سطح جاده و با در نظر گرفتن: (الف) ۵٪، (ب) ۱۰٪ و (ج) ۱۵٪ نویز در اندازه‌گیری

شتاب‌سنج‌های تعبیه شده بر محور وسیله نقلیه انجام می‌گیرد، وسیله نقلیه بدون توقف از روی پل عبور می‌کند.

به منظور شبیه‌سازی عددی، سه وسیله نقلیه به صورت سه سیستم دو درجه آزادی جرم-فنر-دمپر و پل به صورت دوسرهمفصل در نظر گرفته شده است که یک ترک در آن وجود دارد. در ابتدا، سیگنال شتاب به تعدادی قسمت‌های مساوی تقسیم شده است. به منظور حذف اثر پروفیل سطح جاده، از تفاضل سیگنال‌های شتاب بهره گرفته شده است. سپس، با استفاده از نسبت انتقال‌پذیری، شکل مودهای موضعی به دست آمده‌اند. در مرحله بعد، شکل مودهای موضعی طی فرایند میزان‌سازی به شکل مودهای کلی تبدیل گردیده‌اند. در انتها، برای به دست آوردن شاخص آسیب از انحنای شکل مود بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های عددی حاکی از آن است که روش پیشنهادی قادر است مکان آسیب را با دقت قابل قبولی در حضور نویز، تا میزان ۱۵ درصد، به خوبی شناسایی کند.

از آنجا که تحقیق حاضر به عنوان بخش کوچکی از تحقیقات در زمینه پایش غیرمستقیم سلامت پل محسوب می‌گردد، زمینه بررسی‌های بیشتر در این حوزه کاملاً احساس می‌شود. به عنوان مثال، با توجه به امکان حضور هم‌زمان چند ترک در پل، نیاز است تا روش فوق برای شناسایی بیش از یک ترک بسط داده شود. همچنین، تحقیق و بررسی پیرامون شناسایی غیرمستقیم میرایی پل و استفاده از آن برای مکان‌یابی ترک به عنوان موضوعی با اهمیت برای تحقیقات آینده قابل ذکر است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی نوین برای مکان‌یابی غیرمستقیم آسیب در پل در حضور پروفیل سطح جاده و نویز اندازه‌گیری با استفاده از تخمین نسبت انتقال‌پذیری ارائه شده است. یکی از مزیت‌های این روش را می‌توان عدم وابستگی به خصوصیات نیروی تحریک دانست. در حالی که در سایر روش‌ها، فرض شده که نیروی تحریک باید به صورت نویز سفید باشد. همچنین، در این روش، نیاز به وسیله نقلیه مرجع نبوده و از آنجا که داده‌برداری توسط

#### ۵. مراجع

- Araújo, I. G. and Laier, J. E. 2014. "Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices". *Mech. Syst. Signal Pr.*, 46(1): 129-145.
- Davis, S. L., Goldberg, D., DeGood, K., Donohue, N. and Corless, J. 2013. "The fix we're in for: The state of our nation's bridges 2013". *Transportation for America*.
- Fan, W. and Qiao, P. 2009. "A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures". *Int. J. Solids Struct.*, 46(25): 4379-4395.
- Fan, W. and Qiao, P. 2011. "Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study". *Struct. Health Monit.*, 10(1): 83-111.
- Farrar, C. and James III, G. 1997. "System identification from ambient vibration measurements on a bridge".

- J. Sound Vib., 205(1): 1-18.
- Fujino, Y. and Siringoringo, D. 2011. "Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies". *Struct. Infrastruct. Eng.*, 7(7-8): 597-611.
- Hadjileontiadis, L., Douka, E. and Trochidis, A. 2005. "Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures". *Mech. Syst. Signal Pr.*, 19(3): 659-674.
- He, W. Y., He, J. and Ren, W. X. 2018. "Damage localization of beam structures using mode shape extracted from moving vehicle response". *Measurement*, 121: 276-285.
- He, W. Y., Ren, W. X. and Zuo, X. H. 2018. "Mass-normalized mode shape identification method for bridge structures using parking vehicle-induced frequency change". *Struct. Control Health Monit.*, 25(6): e2174.
- Keenahan, J., O'Brien, E. J., McGetrick, P. J. and Gonzalez, A. 2013. "The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping". *Struct. Health Monit.*, 13(2): 143-157.
- Kong, X., Cai, C. and Kong, B. 2014. "Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system". *J. Eng. Mech.*, 141(1): 04014102.
- Li, H., He, C., Ji, J., Wang, H. and Hao, C. 2005. "Crack damage detection in beam-like structures using RBF neural networks with experimental validation". *Int. J. Innov. Comput. Inform. Control*, 1(4): 625-634.
- Lin, C. and Yang, Y. 2005. "Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification". *Eng. Struct.*, 27(13): 1865-1878.
- Malekjafarian, A. and O'Brien, E. 2014a. "Application of output-only modal method to the monitoring of bridges using an instrumented vehicle". *Proc. of the Civil Engineering Research in Ireland Conference, Belfast, Northern Ireland*.
- Malekjafarian, A. and O'Brien, E. 2014b. "Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle". *Eng. Struct.*, 81: 386-397.
- Malekjafarian, A. and O'Brien, E. J. 2017. "On the use of a passing vehicle for the estimation of bridge mode shapes". *J. Sound Vib.*, 397: 77-91.
- Oshima, Y., Yamamoto, K. and Sugiura, K. 2014. "Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles". *Smart Struct. Syst.*, 13(5): 731-753.
- Pakrashi, V., O'Brien, E. and O'Connor, A. 2011. "A review of road structure data in six European countries". *Proc. ICE-Urban Design Plann.*, 164(4): 225-232.
- Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. 1991. "Damage detection from changes in curvature mode shapes". *J. Sound Vib.*, 145(2): 321-332.
- Seo, J., Hu, J. W. and Lee, J. 2015. "Summary review of structural health monitoring applications for highway bridges". *J. Perform. Constr. Fac.*, 30(4): 04015072.
- Shi, Z., Law, S. and Zhang, L. 2000. "Damage localization by directly using incomplete mode shapes". *J. Eng. Mech.*, 126(6): 656-660.
- Sinha, J. K., Friswell, M. and Edwards, S. 2002. "Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data". *J. Sound Vib.*, 251(1): 13-38.
- Standardization, I. O. F., ISO/TC, T. C., Vibration, M., Measurement, S. S. S., Vibration, E. O. M. and Machines, S. A. A. T. 1995. "Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data Application of output-only modal method to the monitoring". *International Organization for Standardization*.
- Tedesco, J. W., McDougal, W. G. and Ross, C. A. 1999. "Structural dynamics: Theory and applications". Addison-Wesley, Menlo Park, CA.
- Wang, L. and Chan, T. 2009. "Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring". *Proceedings of The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development- Planning, Infrastructure Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure*. Queensland University of Technology, Australia, pp. 35-47.
- Yang, Y. B., Chen, W. F., Yu, H. W. and Chan, C. 2013. "Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies". *Eng. Struct.*, 57: 222-231.
- Yang, Y. B., Lin, C. and Yau, J. 2004. "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle". *J. Sound Vib.*, 272(3): 471-493.
- Yang, Y. and Chang, K. 2009. "Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle: Parametric study". *Eng. Struct.*, 31(10): 2448-2459.
- Yang, Y., Lee, Y. and Chang, K. 2014. "Effect of road surface roughness on extraction of bridge frequencies by moving vehicle". PP. 295-305. *In: Mechanics and Model-Based Control of Advanced Engineering Systems*, Springer.
- Yang, Y., Li, Y. and Chang, K. 2012a. "Effect of road surface roughness on the response of a moving vehicle for identification of bridge frequencies". *Interact. Multiscale Mech.*, 5(4): 347-368.
- Yang, Y., Li, Y. and Chang, K. 2012b. "Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: A theoretical study". *Acta Mech.*, 223(8): 1851-1861.

- Yang, Y., Li, Y. and Chang, K. 2014. "Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study". *Smart Struct. Syst.*, 13(5): 797-819.
- Yang, Y. and Yang, J. P. 2018. "State-of-the-art review on modal identification and damage detection of bridges by moving test vehicles". *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 18(02): 1850025.
- Zhang, Y., Wang, L. and Xiang, Z. 2012. "Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle". *J. Sound Vib.*, 331(2): 291-307.
- Zhu, X. and Law, S. 2006. "Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history". *Int. J. Solids Struct.*, 43(7): 2299-2317.