



## شناسایی غیرمستقیم آسیب در پل (تیر) با اندازه‌گیری نسبت انتقال‌پذیری پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه عبوری

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

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده 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

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

### چکیده

در اغلب روش‌های پایش سلامت پل، تعداد زیادی حسگر ارتعاشی روی سازه نصب می‌شوند که این امر معمولاً هزینه‌بر و زمان‌بر است. اخیراً روش‌هایی پیشنهاد شده است که از پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه عبوری به منظور دستیابی به پارامترهای مودال پل بهره می‌برند. در این مقاله، به کمک محاسبه نسبت انتقال‌پذیری پاسخ وسیله نقلیه، به شناسایی غیرمستقیم آسیب در پل پرداخته شده است. از آنجا که داده‌برداری توسط شتاب‌سنج نصب شده روی محور وسیله نقلیه انجام می‌گیرد؛ وسیله نقلیه می‌تواند بدون توقف از روی پل عبور کند و اندازه‌گیری شتاب، درحال حرکت صورت می‌گیرد. از دیگر مزایای این روش، عدم وابستگی به خصوصیات نیروی تحریک است؛ در حالی که در اغلب روش‌ها، فرض نویز سفید برای نیروی تحریک وجود دارد. به منظور شبیه‌سازی، پل به صورت المان محدود و وسیله نقلیه به صورت دو سیستم دو درجه آزادی جرم-فنر-دمپر مدل شده است. با حل هم‌زمان مدل پل-وسیله نقلیه، پاسخ وسیله نقلیه محاسبه و شکل مود پل استخراج شده است. در ادامه با در نظر گرفتن آسیب در پل و حل مجدد، شکل مود جدید محاسبه و با بکارگیری شاخص تغییر انحنای شکل مود، موقعیت آسیب شناسایی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی قادر است، مکان آسیب را با دقت قابل قبولی در حضور نویز شناسایی نماید.

**کلمات کلیدی:** پایش سلامت پل؛ شناسایی غیرمستقیم آسیب؛ نسبت انتقال‌پذیری؛ انحنای شکل مود.

## Indirect Damage Detection in Bridge (Beam) using Transmissibility Measurements from the Response of a Passing Vehicle

S.M.Marashi<sup>1</sup>, M.H.Pashaei<sup>2\*</sup>, M.M.Khatibi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Mech. Eng., Babol Univ. of Tech., Babol, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Babol Univ. of Tech., Babol, Iran

<sup>3</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

### Abstract

In most of the bridge health monitoring techniques based on vibration, a large number of sensors are installed on the structure which may be costly and time-consuming. Recently, some methods have been proposed in which the response of a passing vehicle is utilized in order to achieve the modal properties of the bridge. In this paper, transmissibility measurement of the vehicle response is dedicated to detect the bridge damage indirectly. Since the data is transmitted by accelerometers embedded on the axles of the vehicle, the vehicle is passing over the bridge without stopping and accelerometer is recording without interruption. As another advantage of the method is that the white noise assumption is not necessary for the excitation signal unlike the other related methods. Here, the bridge is modeled by finite element and vehicle is assumed to be two 2DOF systems of mass-spring-damper. By solving the vehicle-bridge interaction equations, the vehicle response is obtained in order to estimate the intact mode shape. Afterwards, a damage is considered in the bridge and the change in mode shape curvature are used for damage localization. Numerical investigations reveal that the proposed method can localize the damage by acceptable accuracy in the presence of noise.

**Keywords:** Bridge Health Monitoring; Indirect Damage Detection; Transmissibility; Mode Shape Curvature.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۱۱-۳۵۵۰۱۳۲۸؛ فکس: ۰۱۱-۳۲۳۱۲۲۶۸

آدرس پست الکترونیک: [mpashaei@nit.ac.ir](mailto:mpashaei@nit.ac.ir)

## ۱- مقدمه

هر سازه به عنوان یک سیستم ارتعاشی شامل، مشخصات جرم، سفتی و میرایی است. به علت وجود عیب در سازه، مشخصات ارتعاشی آن تغییر می‌نمایند. از این تغییرات می‌توان به عنوان علائمی برای وجود آسیب در سازه استفاده نمود. در چند دهه اخیر تحقیقات فراوانی در زمینه تشخیص عیوب سازه‌ای به کمک پارامترهای مودال انجام گرفته است. محدوده وسیعی از تکنیک‌ها، الگوریتم‌ها و روش‌ها به منظور حل مسایل مختلف در سازه‌های گوناگون از اجزاء ساده از قبیل، تیر و صفحه گرفته تا سازه‌های پیچیده از قبیل پل و ساختمان‌ها، بسط و توسعه یافته‌اند [۱-۵].

در سال‌های اخیر، نیاز فزاینده برای بهبود پایش وضعیت ابرسازه‌های حمل و نقل در سراسر دنیا احساس شده است. پل‌ها اجزای اصلی ابرسازه‌های حمل و نقل می‌باشند و نیاز به چنین پایشی دارند. تعداد ۶۶۴۰۵ پل ناقص از نظر سازه‌ای در ایالات متحده وجود دارد (بیش از ۱۱٪) و اغلب آن‌ها عمر بیش از ۶۵ سال دارند [۶]. در اروپا، اکثر این پل‌ها در بازه بعد از جنگ از سال ۱۹۴۵ تا ۱۹۶۵ ساخته شده‌اند [۷]. بارهای اعمالی بر این پل‌ها نیز، در دهه‌های اخیر به موجب افزایش حجم بار و اندازه وسایل نقلیه، تغییر نموده‌است. بعلاوه، اغلب این پل‌ها متحمل زوال تدریجی شده‌اند و بسیاری هم‌اکنون از نظر سازه‌ای دچار نقصان می‌باشند. به‌طور سنتی، نگهداری پل‌ها روش‌های بازرسی بصری متکی است که بسیار گوناگون و فاقد دقت می‌باشند و تنها می‌توانند زمانی آن را تشخیص دهند که آسیب قابل رویت باشد. در کشورهای مستعد بلایای طبیعی نظیر ژاپن، توصیه می‌شود که پایش ابرسازه‌های مهندسی از قبیل پل‌ها به‌طور پیوسته صورت گیرد [۸].

امروزه، پایش با استفاده از پاسخ ارتعاشی، تبدیل به یکی از معروف‌ترین بخش‌های نگهداری ابرسازه‌ها شده است. مروری بر شناسایی آسیب در پل بر اساس ارتعاشات و ارزیابی وضعیت آن توسط وانگ و چان [۹] انجام شده است. نویسندگان ادعان داشته‌اند که به دلیل محدودیت‌های موجود در هر تکنیک، روش منحصر‌بفردی برای شناسایی آسیب کلی یا موضعی در پل وجود ندارد و شناسایی آسیب بر پایه ارتعاشات باید به همراه روش‌های آماری و تکنیک‌های جدید پردازش سیگنال در پایش سلامت پل بکار روند. سئو و

همکارانش [۱۰] پایش سلامت سازه‌ای در پل‌های بزرگراه را مختصراً مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی آن‌ها روش‌های پایش سلامت سازه از قبیل، شناسایی آسیب، ارزیابی ظرفیت سازه‌ای<sup>۱</sup> و تخمین عمر باقیمانده سازه<sup>۲</sup> بوده است.

در اغلب تکنیک‌های پایش سلامت پل بر اساس ارتعاش، تعداد زیادی حسگر<sup>۳</sup> برای استخراج پارامترهای مودال روی سازه نصب می‌شود [۳]. چنین روش‌هایی که در آن‌ها حسگرها به‌طور مستقیم روی پل نصب می‌گردند، به روش‌های مستقیم<sup>۴</sup> و نصب شده در محل<sup>۵</sup> معروف است و ممکن است با توجه به مکان و نوع پل، هزینه‌بر و زمان‌بر باشد. برای حالتی که ترافیک عبوری از پل نتواند متوقف گردد، نصب تجهیزات می‌تواند پرمخاطره شود.

ایده روش غیرمستقیم که در آن پارامترهای مودال پل از پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه عبوری استخراج می‌گردد، توسط یانگ و همکارانش ارائه گردیده است [۱۱، ۱۲]. این روش شامل وسیله نقلیه مجهز شده به حسگر است که پارامترهای مودال پل از آن استخراج می‌گردند. در برهم‌کنش پل-وسیله نقلیه، وسیله نقلیه می‌تواند هم به‌عنوان تحریک‌کننده و هم دریافت‌کننده در نظر گرفته شود. امکان اجرای چنین روشی در عمل توسط لین و یانگ [۱۳]، با عبور دادن یک وسیله‌نقلیه مجهز به حسگر روی یک پل در تابوان تأیید شده است؛ در حالتی که صرفاً فرکانس پل موردنیاز باشد، روش غیرمستقیم در مقایسه با روش‌های مستقیم از مزایای بسیاری مانند، عدم نیاز به تجهیزات زیاد و حضور افراد متخصص در محل، مقرون به صرفه بودن، سهولت، بهره‌وری<sup>۶</sup> برخوردار است. تعداد زیادی از محققان در سال‌های اخیر، روش‌هایی را برای شناسایی فرکانس پل از سیگنال شتاب در وسیله‌نقلیه عبوری توسعه داده‌اند و تعدادی نیز توانایی روش غیرمستقیم برای شناسایی شکل مودهای پل را مورد بررسی قرار دادند. تخمین شکل مودهای پل در بررسی ارتعاشی آن بسیار مهم است. این بدان علت است که ناپیوستگی در شکل مود پل در نقاط مربوط به آسیب اتفاق می‌افتد که شامل،

<sup>1</sup> Structural Capacity Evaluation

<sup>2</sup> Remaining Service Life

<sup>3</sup> Sensor

<sup>4</sup> Direct

<sup>5</sup> On-Site

<sup>6</sup> Efficiency

مودهای پل با استفاده از پاسخ اندازه‌گیری شده از وسیله نقلیه عبوری را ارائه نمودند. آن‌ها 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 آیند. اگر نویز و سرعت وسیله نقلیه کم باشد، شکل مودها می‌توانند با دقت قابل قبولی بدست آیند.

کنگ و همکارانش [۲۲]، با بهره‌گیری از نسبت انتقال‌پذیری به شناسایی غیرمستقیم آسیب در پل پرداخته‌اند. در روش آن‌ها به منظور داده‌برداری باید هر دو وسیله نقلیه و یا حداقل یکی از آن دو روی پل متوقف باشد.

هی و همکارانش [۲۳] با استفاده از تبدیل هیلبرت، شکل مود مرتبه اول با وضوح بالا را استخراج نموده‌اند و انحنای شکل مود موضعی<sup>۴</sup> در محدوده آسیب به منظور افزایش توانایی غلبه بر نویز را معرفی نمودند. در تحقیقی دیگر، هی و همکارانش [۲۴]، روشی برای شناسایی شکل مودهای نرمال شده به جرم بر اساس ویژگی تحمل بار پیشنهاد دادند. اگرچه این روش، شکل مودهایی با وضوح بالا بدست می‌آورد، اما سفتی وسیله نقلیه را بی‌نهایت در نظر گرفته است و در حین داده برداری، وسیله نقلیه روی پل به حالت سکون باشد. الگوریتم جدیدی نیز برای تخمین شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ وسیله نقلیه عبوری توسط ملک‌جعفریان و اوپرایان [۲۵] ارائه گردیده است. در این روش از یک سیستم یدک و یدک‌کش با اعمال تحریک خارجی به پل به منظور رساندن انرژی لازم برای ارتعاش در فرکانس‌های مورد نظر، استفاده شده است.

اگر چه تحقیق ژانگ و همکارانش [۱۸] می‌تواند به‌عنوان اولین تلاش در شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل به حساب آید، ولی مبتنی بر بکار گرفتن وسیله نقلیه محرک و اندازه‌گیری نیروی تحریک است که ممکن است، در حالت واقعی قابل اجرا نباشد. در این راستا، ایده‌های دیگری [۱۹] - [۲۱] نیز ارائه گردیده‌اند که فقط بر اساس پاسخ اندازه‌گیری شده یک وسیله‌نقلیه عبوری است. روش ارائه شده توسط

ناپیوستگی شیب و انحنای شکل مود است [۱۴، ۱۵]. بعلاوه، شکل مود به‌عنوان ابزاری مهم در به‌روزرسانی مدل پل تلقی می‌شود [۱۶].

تشخیص وجود عیب در سازه با استفاده از فرکانس طبیعی امکان‌پذیر است؛ در حالی که برای تعیین موقعیت عیب با دقت مناسب نیاز است تا شکل مودهای ارتعاشی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از شکل مود و مشتقات آن برای شناسایی آسیب دارای مزایایی است؛ اول آنکه، شکل مود شامل اطلاعات مکانی است که نسبت به عیوب موضعی حساس‌تر است؛ دوم آنکه، شکل مود نسبت به فرکانس طبیعی به اثرات محیط از قبیل، دما حساسیت کمتری دارد. از معایب آن نیز می‌توان نیاز به تعداد زیاد حسگر و حساسیت بیشتر به نویز در مقایسه با فرکانس طبیعی اشاره کرد [۱۷].

ژانگ و همکارانش [۱۸] شاخص آسیب جدیدی بر مبنای امیدانس نقطه‌ای ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که اندازه طیف بدست آمده از امیدانس نقطه‌ای تقریباً با مربع شکل مود<sup>۱</sup> متناسب است که می‌تواند برای تشخیص آسیب بکار رود. اگرچه هدف اصلی این مقاله، تخمین شکل مودهای پل نبوده است، اما به عنوان اولین کاربرد روش‌های غیرمستقیم برای شناسایی خواص مرتبط با شکل مود پل به حساب می‌آید.

یانگ و همکارانش [۱۹] از مفهوم مقدار اندازه‌های آنی از تبدیل هیلبرت<sup>۲</sup> پاسخ فیلتر شده در باندی خاص بهره گرفته‌اند و نشان دادند که مولفه پاسخ فرکانسی پل با مقدار دامنه‌ی متغیر نوسان می‌کند که این دامنه همان شکل مود پل است. حساسیت این روش به نویز، در نظر گرفته نشده و توصیه شده که آزمایشات عملی برای تایید یافته‌هایشان صورت پذیرد.

اوشیما و همکارانش [۲۰] روشی تئوری را برای پایش آسیب پل بررسی نموده‌اند که شامل تخمین شکل مودهای پل از پاسخ ارتعاشی وسیله نقلیه متحرک است.

ملک‌جعفریان و اوپرایان [۲۱] استفاده از تجزیه حوزه فرکانس زمان کوتاه<sup>۳</sup> برای شناسایی غیرمستقیم شکل

<sup>1</sup> Mode Shape Square

<sup>2</sup> Hilbert Transform

<sup>3</sup> Short Time Frequency Domain Decomposition

<sup>4</sup> Regional Mode Shape Curvature

## ۲- تئوری

### ۲-۱- مدل‌سازی برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل

در اینجا، از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل بهره گرفته شده است [۲۶]. در این مدل، کلیه معادلات برهم‌کنش پل و وسیله‌نقلیه به صورت یک دستگاه معادلات بهم وابسته در نظر گرفته می‌شود که حل آن در هر گام زمانی انجام می‌پذیرد.

مدل وسیله‌نقلیه به صورت دو سیستم دو درجه آزادی انتخاب و برای سادگی از اتصال آن دو صرف‌نظر شده است (شکل ۱).

در شکل ۱، اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به اولین و دومین محور وسیله‌نقلیه و پارامترهای  $m_s, m_u, k_s, k_t, c_s$  به ترتیب؛ نصف جرم کل بدنه، جرم اکسل وسیله‌نقلیه، سفتی سیستم تعلیق، سفتی لاستیک و میرایی سیستم تعلیق می‌باشند.  $y_s$  به عنوان جابجایی عمودی بدنه و  $y_u$  به عنوان جابجایی عمودی اکسل تعریف شده است و سرعت وسیله‌نقلیه مقدار ثابت  $v$  و فاصله دو محور از هم  $L_v$  است. با توجه به شکل ۱ و پارامترهای مذکور، معادلات حرکت وسیله‌نقلیه به روش تعادل نیرو بدست آمده و در روابط (۱-۴) آورده شده‌اند:

$$m_{s1}\ddot{y}_{s1} + c_{s1}(\dot{y}_{s1} - \dot{y}_{u1}) + k_{s1}(y_{s1} - y_{u1}) = 0 \quad (1)$$

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

$$m_{s2}\ddot{y}_{s2} + c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) + k_{s2}(y_{s2} - y_{u2}) = 0 \quad (3)$$

$$m_{u2}\ddot{y}_{u2} - c_{s2}(\dot{y}_{s2} - \dot{y}_{u2}) - k_{s2}(y_{s2} - y_{u2}) + k_{t2}(y_{u2} - y_b|_{x=vt}) = 0 \quad (4)$$

با تلفیق روابط (۱-۴)، رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$[M_v]\{\ddot{Y}_v\} + [C_v]\{\dot{Y}_v\} + [K_v]\{Y_v\} = \{f_{int}\} \quad (5)$$

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

پل به صورت یک تیر دوسر مفصل با طول  $L$  در نظر گرفته شده که هر المان آن دارای دو گره دو درجه آزادی است. فرض شده که جرم واحد طول، مدول الاستیک و ممان

بانگ و همکارانش [۱۹]، شکل مودهایی با وضوح بالا و دقت قابل قبول، به‌خصوص برای اولین شکل مود، بدست آورده‌است؛ اما، عملکرد این روش در حضور نویز نیاز به بررسی دارد. از طرف دیگر، روش‌های ارائه شده توسط اوشیما و همکارانش [۲۰] و ملک جعفریان و اوبرایان [۲۱] نشان دهنده حساسیت بالا به نویز است که یکی از خصوصیات ذاتی یک سیستم در اندازه‌گیری واقعی است. اگرچه کنگ و همکارانش [۲۲]، از انتقال‌پذیری به منظور شناسایی آسیب در پل استفاده نمودند، اما توقف حداقل یکی از دو وسایل‌نقلیه در حین داده‌برداری لازم است.

از آنجاکه در میان روش‌های موجود، صرفاً روش بر مبنای انتقال‌پذیری مستقل از فرض نویز سفید برای تحریک است و کارایی مناسبی در حضور نویز دارد، به نظر می‌رسد که می‌توان روشی جدید بر مبنای انتقال‌پذیری ارائه داد که با استفاده از تکنیک زمان کوتاه، نیاز روش‌های قبلی انتقال‌پذیری به توقف وسیله‌نقلیه را مرتفع نمود.

بنابراین در این مقاله، یک روش جدید برای شناسایی غیرمستقیم آسیب در پل ارائه می‌شود که بر مبنای انتقال‌پذیری زمان کوتاه پیاده‌سازی شده است. در این روش اندازه‌گیری شتاب در حین حرکت وسیله‌نقلیه صورت می‌گیرد و نیازی به توقف وسیله‌نقلیه نمی‌باشد؛ همچنین، با توجه به استفاده از نسبت انتقال‌پذیری نیازی به فرض نویز سفید در تحریک نمی‌باشد.

به منظور ارزیابی عددی روش ارائه شده، یک پل دوسر مفصل به صورت المان محدود و وسیله‌نقلیه به صورت دو سیستم دو درجه آزادی جرم-فنر-دمپر مدل شده است. با حل هم‌زمان مدل پل-وسیله‌نقلیه، پاسخ وسیله‌نقلیه محاسبه می‌گردد. با کمک سیگنال شتاب کوتاه شده، نسبت انتقال‌پذیری محاسبه و روش تجزیه مقدار تکین بر ماتریس‌های انتقال‌پذیری اعمال شده است. سپس، شکل مود پل سالم بدست آمده است. در ادامه با در نظر گرفتن یک آسیب در پل و حل مجدد مساله، شکل مود برای حالت معیوب محاسبه و با بکارگیری شاخص تغییر انحنای شکل مود، موقعیت آسیب شناسایی شده است. کارامدی این روش در حضور نویز نیز، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- شناسایی پارامترهای مودال به روش انتقال پذیری در فرایندهای اتفاقی، نسبت چگالی طیف توان<sup>۱</sup> نقاط ۰ و  $j$  نسبت به نقطه مرجع  $k$ ، چگالی طیف توان انتقال پذیری<sup>۲</sup> نامیده می‌شود که به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌گردد [۲۸]:

$$T_{x_0 x_j}^k(i\omega) = \frac{S_{x_0 x_k}(i\omega)}{S_{x_j x_k}(i\omega)} \quad (11)$$

$i$  عدد موهومی  $\sqrt{-1}$  و  $S_{x_0 x_k}$  چگالی طیف توان خروجی‌های  $x_k$  و  $x_j$  توان خروجی‌های  $x_k$  و  $x_0$  می‌باشند. با استفاده از رابطه بین چگالی طیف توان خروجی-ورودی، رابطه (۱۱) به صورت رابطه (۱۲) قابل بازنویسی است:

$$T_{x_0 x_j}^k(i\omega) = \frac{\sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N H_{x_0 f_r}^*(i\omega) H_{x_k f_s}(i\omega) S_{f_r f_s}(i\omega)}{\sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N H_{x_j f_r}^*(i\omega) H_{x_k f_s}(i\omega) S_{f_r f_s}(i\omega)} \quad (12)$$

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

با فرض جدا بودن مودهای ارتعاشی و کوچک بودن میرایی، در نزدیکی هر یک از مودهای سیستم، فرکانس متناظر با آن مود، فرکانس غالب در پاسخ ارتعاشی سازه است و سهم سایر مودهای ارتعاشی قابل صرف نظر کردن است (رابطه ۱۳) [۲۸]:

$$\lim_{\omega \rightarrow i\omega_l} T_{x_0 x_j}^k(i\omega) = \lim_{\omega \rightarrow i\omega_l} \frac{S_{x_0 x_k}(i\omega)}{S_{x_j x_k}(i\omega)} = \frac{\psi_{ol}^* \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \hat{H}_{z_l f_r}^*(i\omega_l) S_{f_r f_s}(i\omega_l) \hat{H}_{z_l f_s}(i\omega_l) \psi_{kl}}{\psi_{jl}^* \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \hat{H}_{z_l f_r}^*(i\omega_l) S_{f_r f_s}(i\omega_l) \hat{H}_{z_l f_s}(i\omega_l) \psi_{kl}} = \frac{\psi_{ol}^*}{\psi_{jl}^*} \quad (13)$$

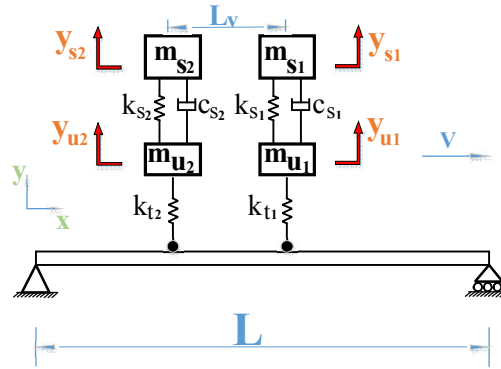
$\psi_{kl}$  درجه آزادی  $k$  شکل مود  $l$ ام و  $\omega_l$  فرکانس طبیعی  $l$ ام است.

به روشی مشابه، با تعریف نقطه مرجعی دیگر، مانند  $z$ ، انتقال پذیری به سمت مقداری مشابه میل می‌نماید (رابطه ۱۴) [۲۸]:

$$\lim_{\omega \rightarrow i\omega_l} T_{x_0 x_j}^z(i\omega) = \lim_{\omega \rightarrow i\omega_l} \frac{S_{x_0 x_z}(i\omega)}{S_{x_j x_z}(i\omega)} = \frac{\psi_{ol}^*}{\psi_{jl}^*} \quad (14)$$

<sup>1</sup> Power Spectrum Density

<sup>2</sup> Power Spectrum Density of Transmissibility



شکل ۱- مدل برهم کنش وسیله نقلیه با پل

اینرسی مقطع پل ثابت باشد؛ بنابراین معادله حرکت پل می‌تواند به صورت رابطه (۶) بیان شود:

$$[M_b]\{\ddot{Y}_b\} + [C_b]\{\dot{Y}_b\} + [K_b]\{Y_b\} = \{f_{int}\} \quad (6)$$

که  $[M_b]$ ،  $[C_b]$ ، و  $[K_b]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی پل و  $\{Y_b\}$ ،  $\{\dot{Y}_b\}$  و  $\{\ddot{Y}_b\}$  به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی می‌باشند. با فرض میرایی متناسب برای پل، ماتریس میرایی به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$[C_b] = \alpha[M_b] + \beta[K_b] \quad (7)$$

که ثوابت  $\alpha$  و  $\beta$  از رابطه (۸) بدست می‌آیند [۲۱]:

$$\alpha = \frac{2\zeta\omega_1\omega_2}{(\omega_1 + \omega_2)}, \quad \beta = \frac{2\zeta}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (8)$$

که  $\zeta$  نشان دهنده ضریب میرایی پل،  $\omega_1$  و  $\omega_2$  به ترتیب اولین و دومین فرکانس طبیعی پل می‌باشند.

با ترکیب معادلات (۵) و (۶)، معادله کوپله برهم کنش وسیله نقلیه با پل به صورت رابطه (۹) بدست می‌آید:

$$[M_T]\{\ddot{Y}_T\} + [C_T]\{\dot{Y}_T\} + [K_T]\{Y_T\} = \{F_T\} \quad (9)$$

که  $[M_T]$ ،  $[C_T]$ ، و  $[K_T]$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سفتی کل سیستم پل-وسیله نقلیه و  $\{F_T\}$  بردار مربوط به نیروی برهم کنش است و بردار جابجایی،  $\{Y_T\}$ ، به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\{Y_T\} = \begin{Bmatrix} Y_p \\ Y_b \end{Bmatrix} \quad (10)$$

پاسخ معادله (۹) با استفاده از روش انتگرال گیری ویلسون تتا قابل دستیابی است [۲۷]. مقدار بهینه برای پایداری غیرمشرط در انتگرال گیری ویلسون تتا مقدار  $\theta = 1.420815$  و کلیه شرایط اولیه صفر در نظر گرفته می‌شوند [۲۷].

به منظور محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم، نمودار  $\pi(i\omega)$  بر حسب  $\omega$  ترسیم می‌شود. قله‌های این نمودار همان فرکانس‌های طبیعی هستند.

می‌توان نشان داد که بردارهای تکین،  $[U(i\omega)]$ ، بردارهای ویژه ماتریس  $[T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] [T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)]^T$  می‌باشند که ضریبی از شکل مودهای سیستم هستند. مساله مقدار ویژه برای ماتریس  $[T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] [T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)]^T$  زمانی که  $i\omega = i\omega_l$ ، به فرم رابطه (۱۹) است [۲۸]:

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} \left[ [T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] [T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)]^T - \lambda_p(i\omega) I \right] \{U(i\omega)\}_p - \lambda_p(i\omega_l) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U(i\omega_l)_1 \\ U(i\omega_l)_2 \end{Bmatrix}_p \quad (19)$$

بنابراین، اولین بردار ویژه ماتریس  $[T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] [T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)]^T$  هنگامی که  $i\omega = i\omega_l$  به صورت رابطه (۲۰) حاصل می‌آید:

$$\{U\}_1 = \frac{1}{\sqrt{\psi_{11}^2 + \psi_{21}^2}} [\psi_{11} \quad \psi_{21}] \quad (20)$$

با توجه به رابطه (۲۰)، می‌توان دریافت که در نزدیکی فرکانس طبیعی، اولین بردار تکین در ماتریس  $[U(i\omega)]$  (رابطه (۱۷))، متناسب با شکل مود سیستم است.

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

از آنجاکه در روش مورد استفاده در این مقاله صرفاً از دو شتاب‌سنج نصب شده روی وسیله‌نقلیه متحرک برای اندازه‌گیری شتاب پل استفاده می‌شود، بنابراین امکان استفاده مستقیم از رابطه (۱۷) برای محاسبه شکل مود وجود ندارد، در نتیجه در این بخش روشی بکار گرفته می‌شود که با تقسیم‌بندی سیگنال شتاب اندازه‌گیری شده به بازه‌های زمانی، امکان محاسبه شکل مود فراهم گردد.

ایده استخراج شکل مودهای پل به روش زمان کوتاه، اولین بار توسط ملک‌جعفریان و اوپرایان ارائه گردید [۲۱]. برای این امر، سیگنال دریافت شده از دو محور متوالی در بازه‌های زمان کوتاه در نظر گرفته می‌شود. فاصله بین دو محور نیز برای تقسیم‌بندی پل مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماتریس شتاب به صورت رابطه (۲۱) قابل تعریف است:

اکنون با تغییر نقاط  $0$ ، ماتریس انتقال‌پذیری به صورت رابطه (۱۵) قابل بیان است:

$$[T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] = \begin{bmatrix} T_{x_1 x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_1 x_j}^{z_2}(i\omega) \\ T_{x_2 x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_2 x_j}^{z_2}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (15)$$

با نزدیک شدن به قطب‌های سیستم و با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴)، رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} [T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] = \begin{bmatrix} \psi_{1l}^* & \psi_{1l}^* \\ \psi_{j1}^* & \psi_{j1}^* \\ \psi_{2l}^* & \psi_{2l}^* \\ \psi_{jl}^* & \psi_{jl}^* \end{bmatrix} \quad \text{where } \frac{\psi_{o_i l}^*}{\psi_{j l}^*} = 1 \text{ if } x_{o_i} = x_j \quad (16)$$

ستون‌های ماتریس رابطه (۱۶) مستقل خطی نمی‌باشند؛ لذا مرتبه این ماتریس برای  $i\omega = i\omega_l$  برابر یک می‌شود. با اعمال تجزیه مقدار تکین<sup>۱</sup>، دومین مقدار تکین این ماتریس به سمت صفر میل خواهد کرد؛ بنابراین، معکوس دومین مقدار تکین می‌تواند برای بدست آوردن فرکانس طبیعی سیستم بکار گرفته شود [۲۸].

تجزیه مقدار تکین ماتریس انتقال‌پذیری  $T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)$  به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌گردد:

$$[T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)] = [U^j(i\omega)]_{2 \times 2} [\Lambda^j(i\omega)]_{2 \times 2} [V^j(i\omega)]_{2 \times 2}^* \quad (17)$$

بردارهای تکین چپ و راست ماتریس  $T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)$  به ترتیب  $[U^j(i\omega)]$  و  $[V^j(i\omega)]$  و \* مزدوج مختلط است. مقادیر تکین ماتریس  $T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)$  به صورت قطری در ماتریس  $[\Lambda^j(i\omega)]$  طوری چیده شده‌اند که  $\sigma_1(i\omega) \geq \sigma_2(i\omega)$  برای هر ماتریس  $T_{x_o_i x_j}^{z_i}(i\omega)$ ، مقادیر تکین به صورت  $\Lambda(i\omega)^j = [\sigma(i\omega)_1^j \quad \sigma(i\omega)_2^j]$  نمایش داده می‌شوند؛ بنابراین، شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از تجزیه مقدار تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال‌پذیری (PSDTM-SVD) از مقدار تکین بهره می‌برد تا فرکانس‌های طبیعی را بدست آورد [۲۸]. معکوس دومین مقدار تکین با نام  $\pi(i\omega)$  تعریف می‌شود (رابطه (۱۸)):

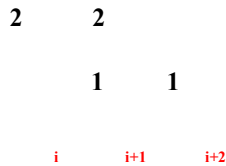
$$\pi(i\omega) = \frac{1}{\sigma(i\omega)_2} \quad (18)$$

<sup>1</sup> Singular Value Decomposition

که  $\phi_1$  و  $\phi_2$  به ترتیب، به شکل مودهای کلی اولین و دومین قسمت از پل اشاره دارد. از آنجایی که شتاب مربوط به دومین قسمت از پل توسط محور جلو و نیز محور عقب در زمان‌های مختلف ثبت شده است، لذا دو مقدار برای شکل مود این قسمت موجود است. با فرض  $\psi_{2,2}$  به عنوان شکل مود موضعی قسمت دوم پل که از محور عقب تخمین زده شده است، نسبت میزان‌سازی، مقدار  $\phi_2/\psi_{2,2}$  می‌شود. با استفاده از این نسبت میزان‌سازی و در نظر گرفتن شکل مود موضعی قسمت سوم  $(\psi_{3,1})$ ، شکل مود کلی قسمت سوم پل از نسبت  $\psi_{3,1}\phi_2/\psi_{2,2}$  بدست می‌آید. به همین طریق، سایر شکل مودهای کلی به صورت رابطه (۲۴) قابل محاسبه هستند:

$$\phi = \left\{ \phi_1 \quad \phi_2 \quad \psi_{3,1} \frac{\phi_2}{\psi_{2,2}} \quad \dots \quad \psi_{i+1,1} \frac{\phi_i}{\psi_{i,2}} \right\}^T \quad i = 3; N - 1 \quad (24)$$

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



$$\ddot{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_{i,2} \\ \ddot{y}_{i+1,1} \end{bmatrix} \quad i = 1; \dots, N-1, \quad (21)$$

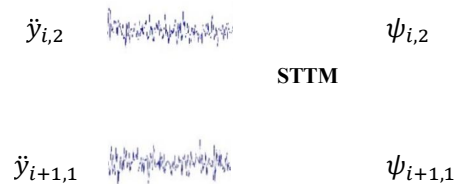
$\ddot{y}_{i,2}$  و  $\ddot{y}_{i+1,1}$  به ترتیب، شتاب اولین و دومین محور می‌باشند هنگامی که از قسمت  $(i+1)$ ام و  $i$ ام در حال عبور هستند. بردار شکل مود موضعی مربوط به قسمت  $(i+1)$ ام و  $i$ ام با اعمال روش انتقال‌پذیری بر ماتریس شتاب،  $\ddot{Y}$ ، قابل محاسبه هستند (رابطه (۱۷)).

شکل ۲ روند حصول بردار شکل مود موضعی به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری-زمان کوتاه از ماتریس شتاب  $\ddot{Y}$  را نمایش می‌دهد (رابطه (۲۲)):

$$\psi = \begin{Bmatrix} \psi_{i,2} \\ \psi_{i+1,1} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

بعد از عبور وسیله‌نقلیه از پل، تمام بردارهای شکل مود موضعی بدست می‌آیند. از آنجاکه بردارهای شکل مود موضعی به طور هم‌زمان بدست نیامده‌اند، برای دست‌یابی به بردار شکل مودهای کلی باید میزان‌سازی انجام گیرد. روند میزان‌سازی بدین گونه است که اولین بردار شکل مود موضعی به عنوان شکل مود کلی در نظر گرفته می‌شود (رابطه (۲۳)):

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \psi_{1,2} \\ \phi_2 &= \psi_{2,1} \end{aligned} \quad (23)$$



شکل ۲- محاسبه شکل مود به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری زمان کوتاه

ترک نیز توسط عمق ترک که درصدی از عمق تیر است، تعریف می‌شود.

استفاده از شاخص‌های شناسایی آسیب پیشنهادی طولانی دارد [۴]. برخی از این شاخص‌ها [۳۰-۳۲]، از تغییرات شکل مود و برخی دیگر [۱۴، ۳۳] از انحنای شکل مود استفاده می‌کنند که حساسیت بیشتری به حضور آسیب دارند. در این مقاله از روش مقاله پاندی و همکارانش [۱۴] برای شناسایی

#### ۲-۴- شناسایی آسیب با استفاده از انحنای شکل مود

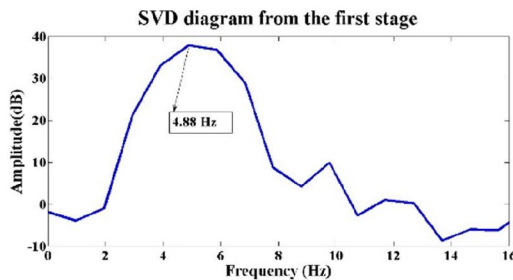
در این مقاله، آسیب در پل به صورت روش پیشنهادی توسط سینها و همکارانش [۲۹]، مدل‌سازی شده است. فرض بر این است که ترک سبب کاهش سفتی در محدوده‌ی حضور خود می‌گردد و انعطاف‌پذیری در هر دو طرف ترک به صورت خطی از قسمت سالم تا قسمت معیوب تغییر می‌کند. شدت

جدول ۲- مشخصات پل

مقدار	نام‌گذاری	مشخصات
۲۸۱۲۵	$\bar{m}$	جرم واحد طول (kg/m)
۱۶	$L$	طول (m)
۳۵۰۰۰	$E$	مدول الاستیک (MPa)
۰/۵۲۷۳	$I$	ممان دوم سطح مقطع (m <sup>4</sup> )

تعداد ۱۶ المان در مدل اجزاء محدود برای تیر و سه مکان مختلف برای ترک (المان‌های ۵، ۸ و ۱۱) با سه شدت مختلف (۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪) در نظر گرفته شده‌اند. دو عدد شتاب سنج هر کدام روی یکی از محورها، داده‌های شتاب را ثبت می‌نمایند.

به منظور محاسبه فرکانس طبیعی پل باید دومین مقادیر تکین از رابطه (۱۸) بر حسب  $\omega$  ترسیم شود که اولین قله غالب در این نمودار به عنوان اولین فرکانس طبیعی محسوب می‌گردد. برای نمونه، دومین مقدار تکین از اولین مرحله شناسایی برای ترک با شدت ۲۰٪ در المان پنجم در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- دومین مقدار تکین از اولین مرحله شناسایی با فرض ترک با شدت ۲۰٪ در المان پنجم

به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شده در این مقاله، اولین فرکانس طبیعی از این تحقیق با اولین فرکانس طبیعی گزارش زده در مقاله [۳۴]، مقایسه شده است (جدول ۲) که درصد خطای ۱/۸ نشان از دقت قابل قبول مدل مذکور دارد.

آسیب بهره گرفته شده است. با تعریف شاخص آسیب به صورت اختلاف بین مشتق دوم شکل مود سازه سالم و سازه معیوب، تغییرات انحنا به صورت رابطه (۲۵) بیان می‌شود:

$$\Delta\phi_i'' = |\phi_i''^d - \phi_i''| \quad (25)$$

$\phi_i''^d$  و  $\phi_i''$  به ترتیب، مشتق دوم شکل مود سازه معیوب و سازه سالم در نقطه  $i$  می‌باشند. مشتق دوم شکل مود از تقریب تفاضل مرکزی (رابطه (۲۷)) حاصل می‌آید:

$$\phi_i'' = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi_i + \phi_{i-1}}{h^2} \quad (26)$$

که  $h$  فاصله بین نقاط اندازه‌گیری شکل مود است. میانگین  $\Delta\phi_i''$  برای تمام مودها، به عنوان شاخص شناسایی آسیب در نقطه مورد نظر تعریف می‌شود (رابطه (۲۷)):

$$MSC_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta\phi_i'')_n \quad (27)$$

با رسم  $MSC_i$  بر حسب طول پل، می‌توان مکان آسیب را شناسایی نمود.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

در این بخش، شناسایی آسیب در پل با استفاده از روش پیشنهادی به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. مدل برهم‌کنش وسیله‌نقلیه-پل از بخش ۲-۱ به صورت دو محور مشابه با مشخصات ارتعاشی مندرج در جدول ۱ و پل به صورت اوپلر-برنولی با مشخصات مندرج در جدول ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

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)
$4 \times 10^5$	$k_{s1}, k_{s2}$	سفتی تعلیق (N/m)
$10 \times 10^2$	$c_{s1}, c_{s2}$	میرایی تعلیق (N.s/m)
$1/75 \times 10^6$	$k_{t1}, k_{t2}$	سفتی لاستیک (N/m)
۱	$L_v$	فاصله بین دو محور (m)



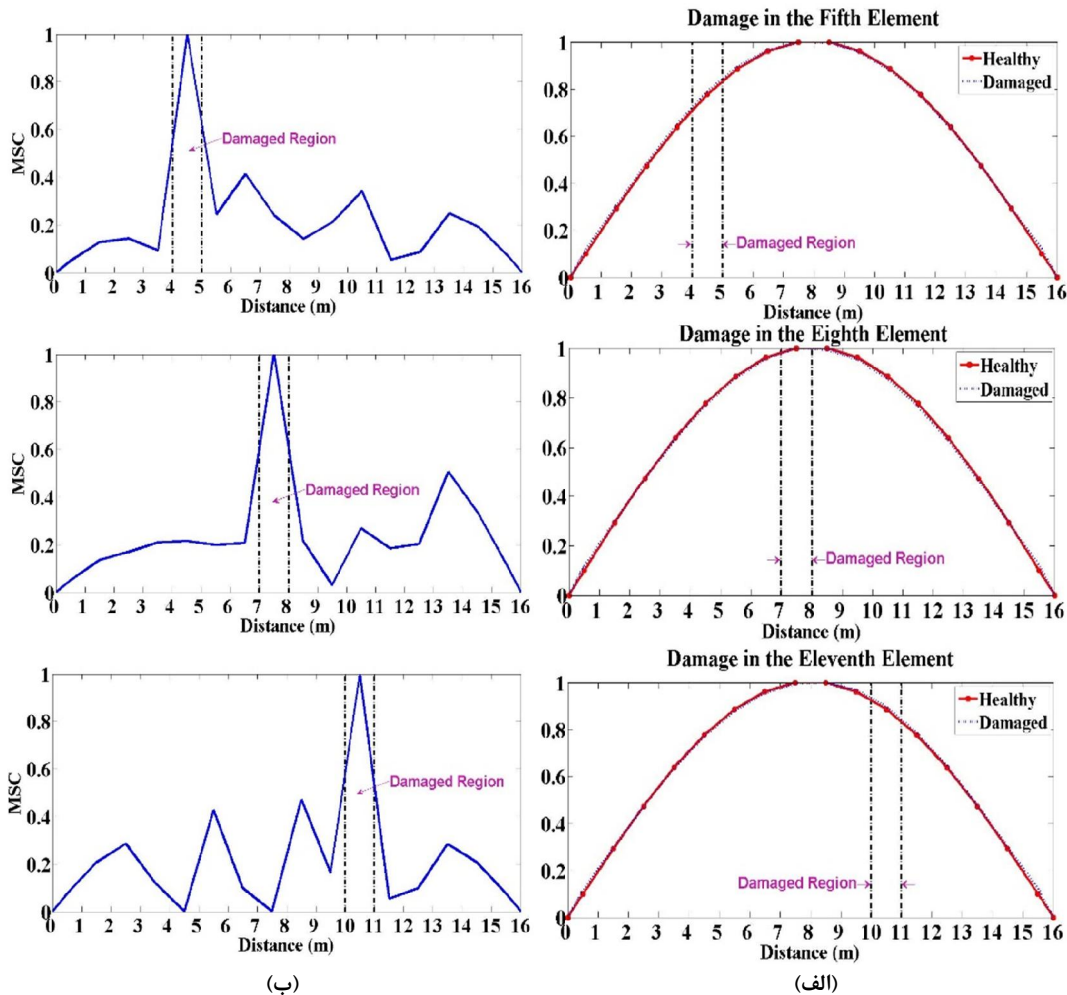
فاصله دو محور از هم ( $L_v = 1m$ )، تعداد ۱۶ نقطه برای شکل مود حاصل می‌گردد که هر یک از نقاط مربوط به وسط فاصله دو محور است. سپس با استفاده از رابطه (۲۴)، شکل مودهای موضعی به شکل مودهای کلی تبدیل می‌گردند. قسمت‌های (الف) از شکل ۴ تا شکل ۶، شکل مودها را برای حالت سالم و معیوب با شدت مختلف ترک نمایش می‌دهند.

به منظور شناسایی ترک، شاخص آسیب از رابطه (۲۷) برای هر یک از مقادیر ترک در قسمت‌های (ب) از شکل ۴ تا شکل ۶، ترسیم شده و مکان آسیب با دقت قابل قبولی بدست آمده است.

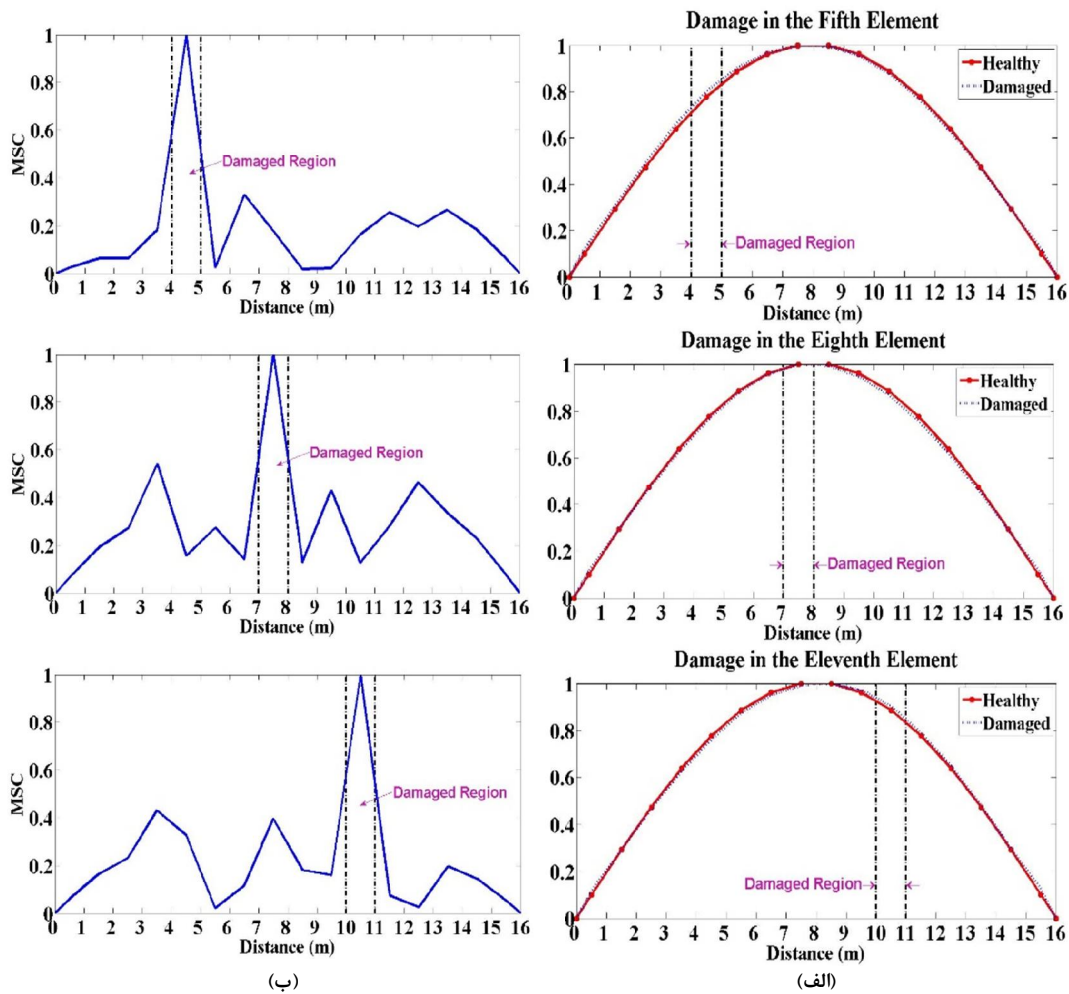
جدول ۳- مقایسه اولین فرکانس طبیعی

مقدار	نام‌گذاری	مشخصات
۴/۸۸	$\omega_1$	اولین فرکانس طبیعی (Hz)
۴/۹۷	$\omega_1$	اولین فرکانس طبیعی از تحقیق [۳۴] (Hz)
۱/۸	error	خطا (%)

از طرفی، شکل مود سیستم متناسب با اولین بردار تکین در ماتریس  $[U(i\omega)]$  در رابطه (۱۷) است. با توجه به مقدار



شکل ۴- الف) اولین شکل مود برای پل سالم و معیوب با فرض ترک با شدت ۲۰٪ در المان‌های ۵، ۸ و ۱۱ و ب) شناسایی مکان ترک با استفاده از انحنای شکل مود



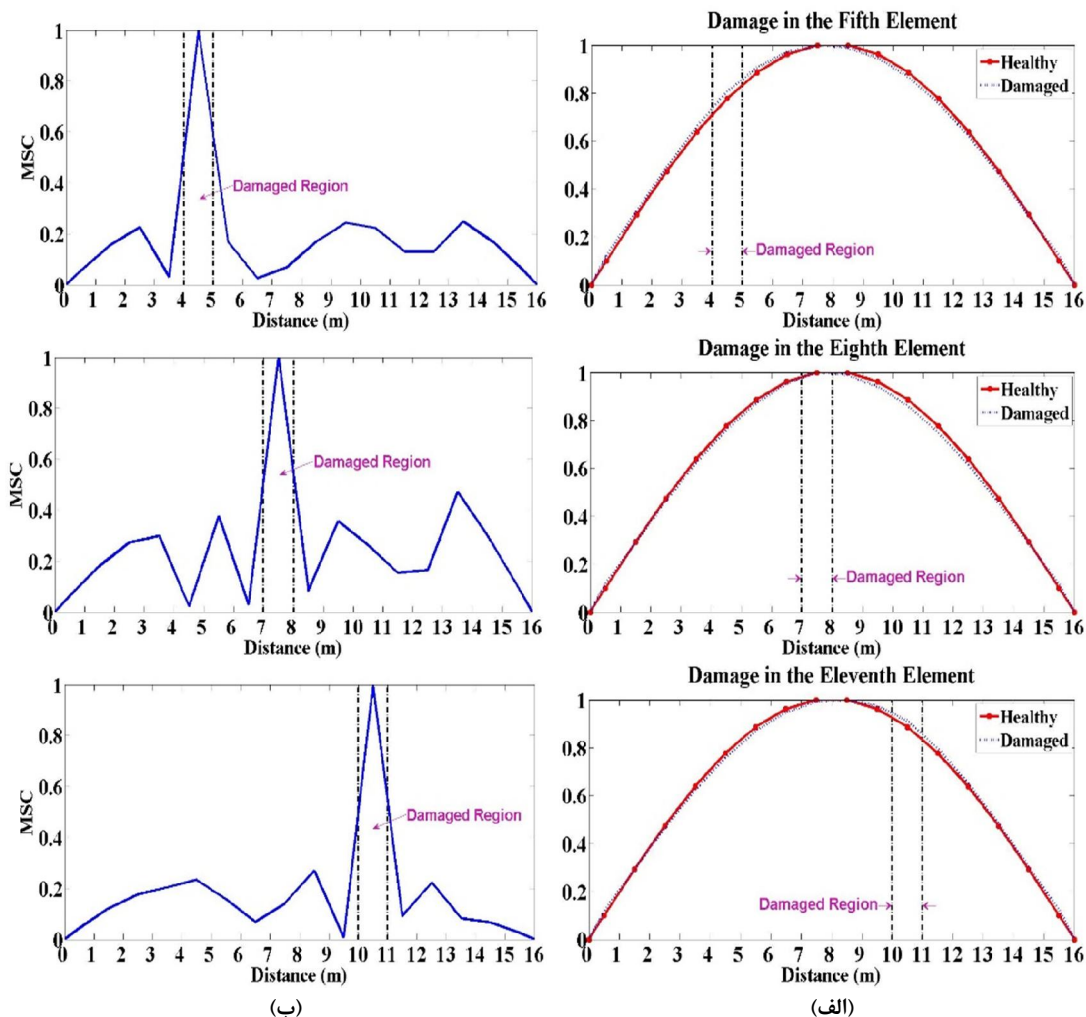
شکل ۵- الف) اولین شکل‌مод برای پل سالم و معیوب با فرض ترک با شدت ۴۰٪ در المان‌های ۵، ۸ و ۱۱ و ب) شناسایی مکان ترک با استفاده از انحنای شکل‌مود

که  $w$ ، معرف سیگنال آغشته به نویز،  $E_p$ ، شدت نویز،  $noise$ ، بردار توزیع نرمال استاندارد با مقدار میانگین صفر و انحراف معیار واحد و  $\sigma(w_{catc})$  انحراف معیار سیگنال شتاب است.

شکل ۷ تا ۹ نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در حضور مقادیر نویز تا ۱۵٪، از توانایی خوبی برای شناسایی آسیب برای هر یک از مقادیر شدت ترک برخوردار است.

از آنجا که در محیط واقعی، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، همواره در معرض اثرات نامطلوب محیطی و یا تداخلات سیستمی می‌باشند، بررسی حساسیت به نویز از اهمیت خاصی در کاربردهای پایش سلامت در سازه‌های مهندسی برخوردار است. در این تحقیق، نویز سفید گوسی با درصدهای مختلف مطابق رابطه (۲۸) به سیگنال شتاب اضافه و مراحل شناسایی آسیب مجدداً انجام شده است.

$$w = w_{catc} + E_p \text{ noise } \sigma(w_{catc}) \quad (28)$$

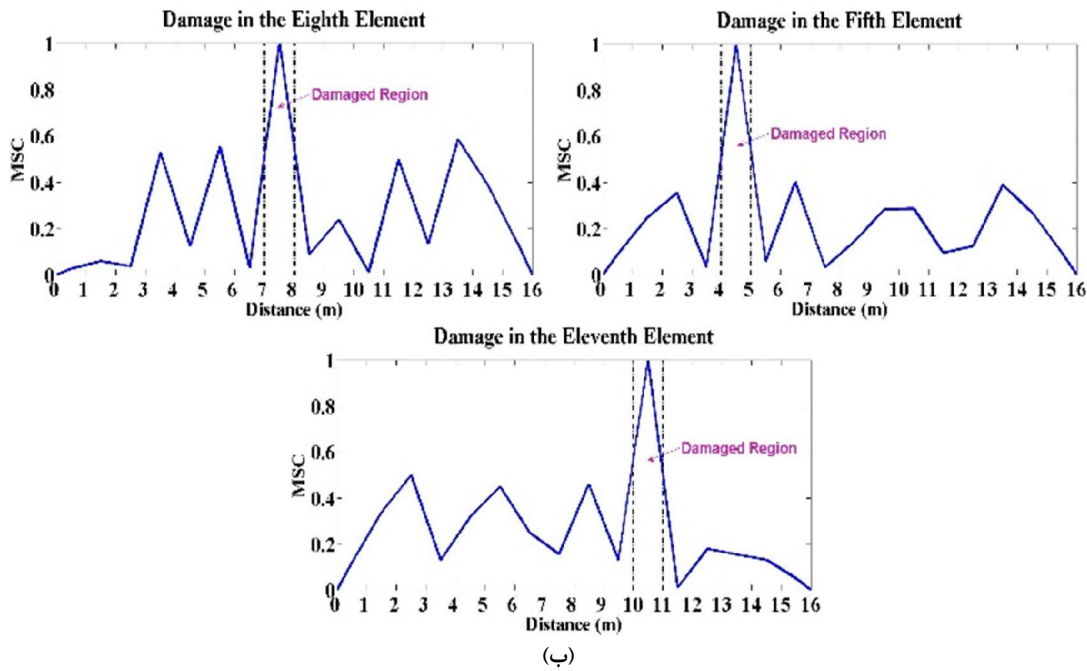
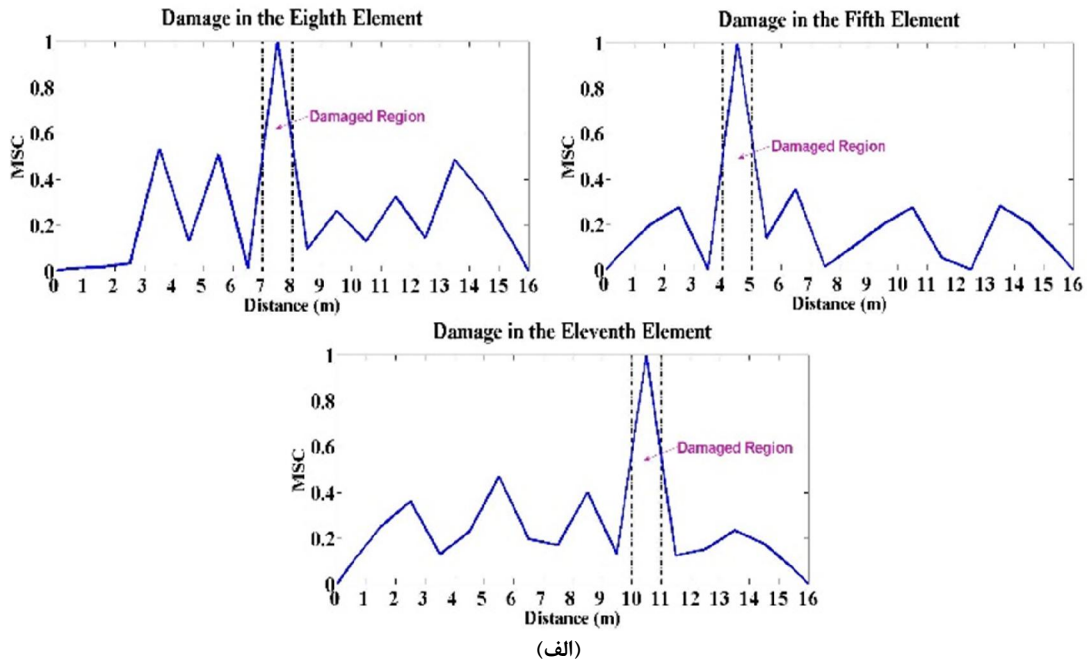


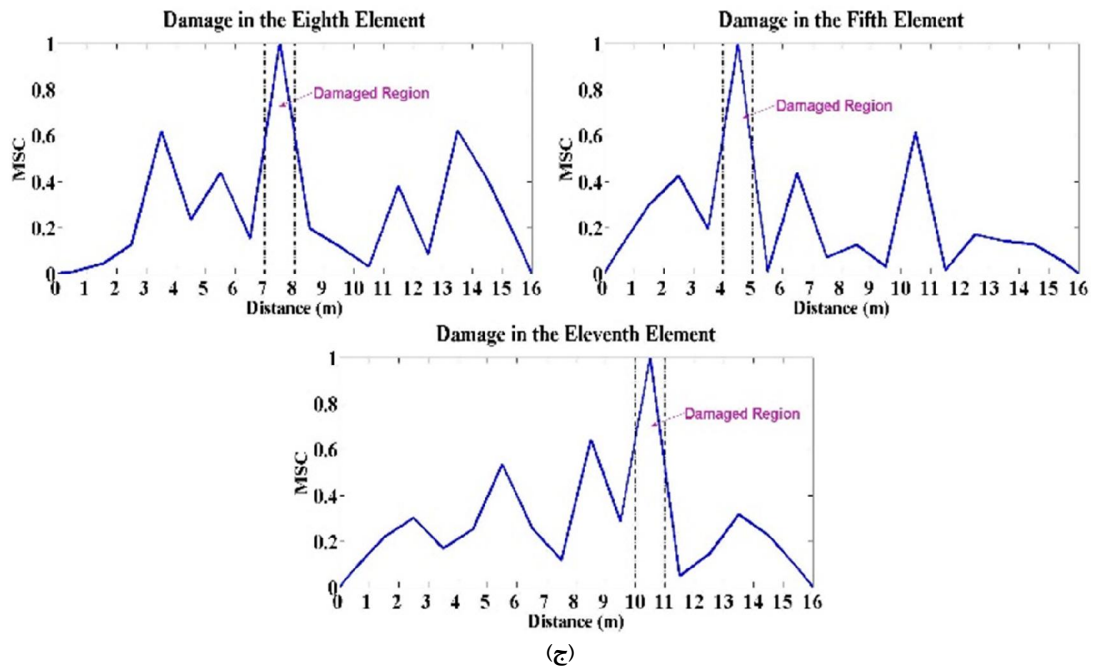
شکل ۶- الف) اولین شکل مود برای پل سالم و معیوب با فرض ترک با شدت ۰.۶٪ در المان‌های ۵، ۸ و ۱۱ و ب) شناسایی مکان ترک با استفاده از انحنای شکل مود

صحیح پارامترهای مودال مواجهه نماید؛ لذا در اینجا استفاده از انتقال‌پذیری به عنوان روشی پیشنهاد شده است که هیچگونه فرضی برای نوع تحریک سیستم قائل نمی‌باشد. به طور کلی، قطب‌هایی که در اندازه‌گیری‌های انتقال‌پذیری، شناسایی می‌شوند با قطب‌های سیستم مطابقت ندارند؛ به همین علت نیروهای محیطی مجهول، می‌توانند به صورت دلخواه از قبیل نویز رنگی، سینوسی فرکانس متغیر، ضربه و غیره باشد به شرطی که این نیروها

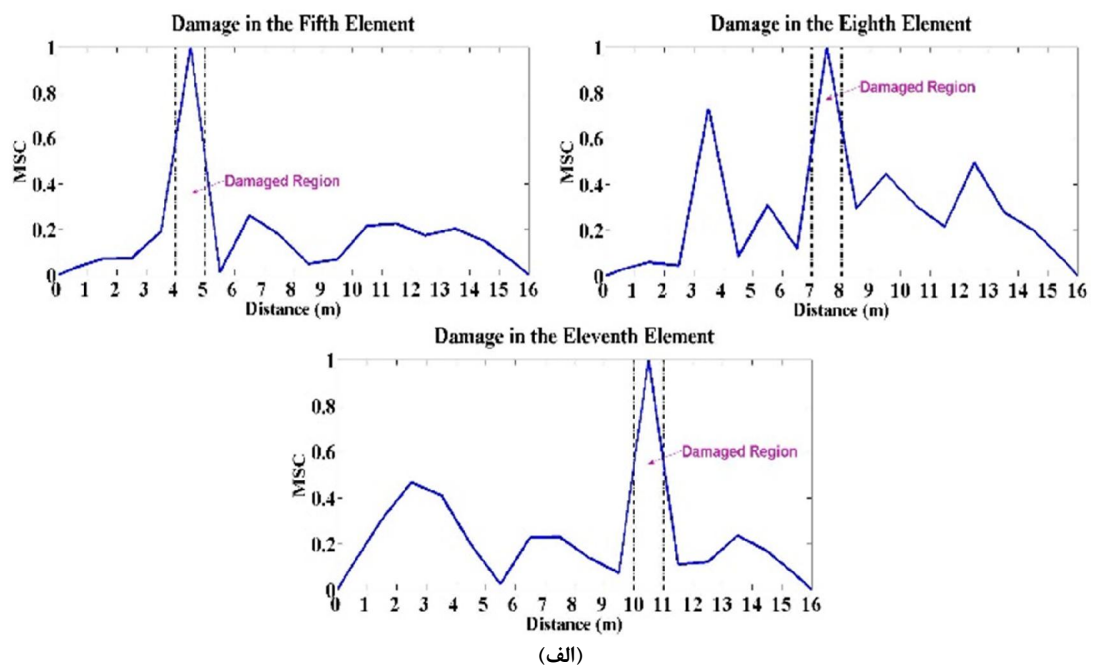
### ۳- نتیجه‌گیری

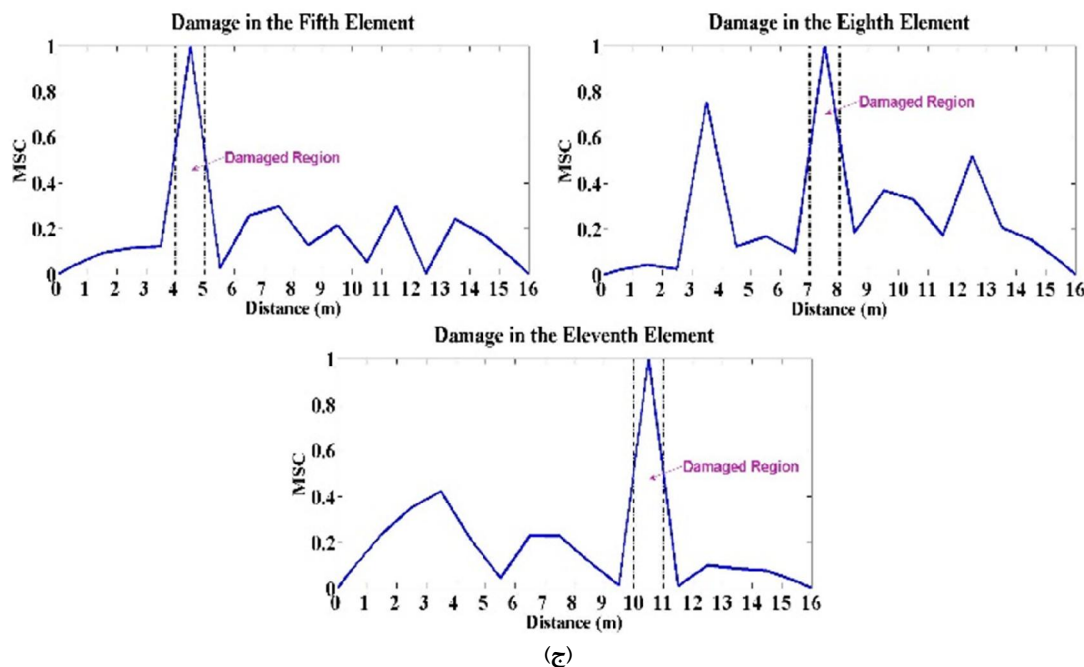
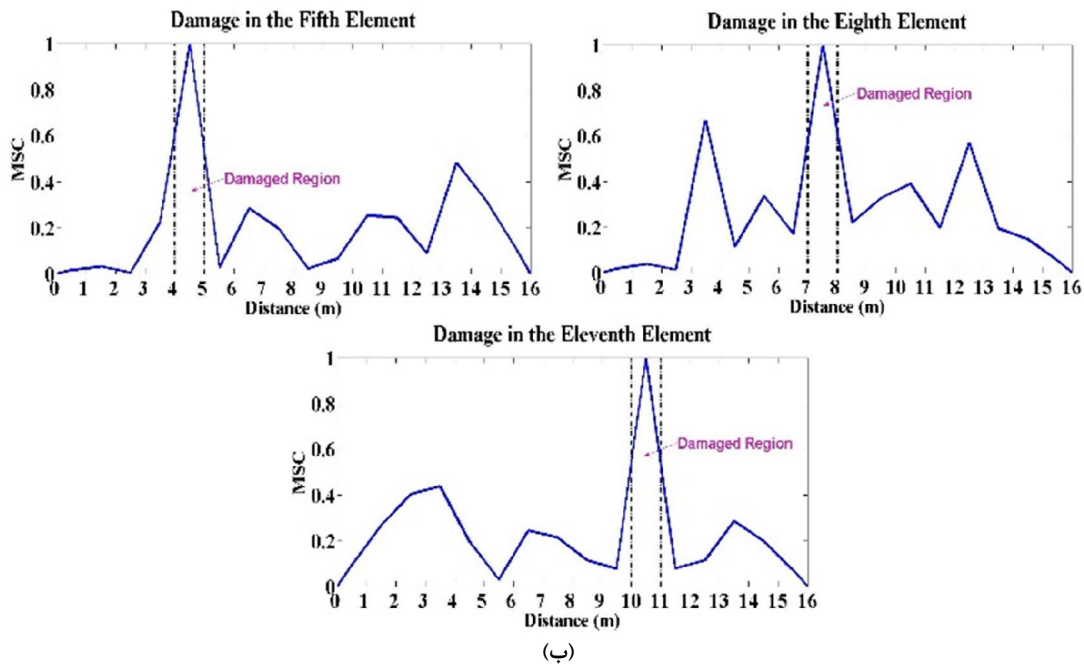
در این مقاله، روش جدیدی برای شناسایی غیرمستقیم آسیب با استفاده از اندازه‌گیری انتقال‌پذیری در پل ارائه شده است. یکی از محدودیت‌های روش‌های موجود در آنالیز مودال محیطی این است که تحریکات اندازه‌گیری نشده‌ای که به سیستم وارد می‌شوند، باید نویز سفید باشند؛ اما ارتعاشات سازه در شرایط کاری نمی‌تواند همیشه به صورت تحریک خالص نویز سفید در نظر گرفته شود که ممکن است، روش‌های موجود را با مشکلاتی در شناسایی



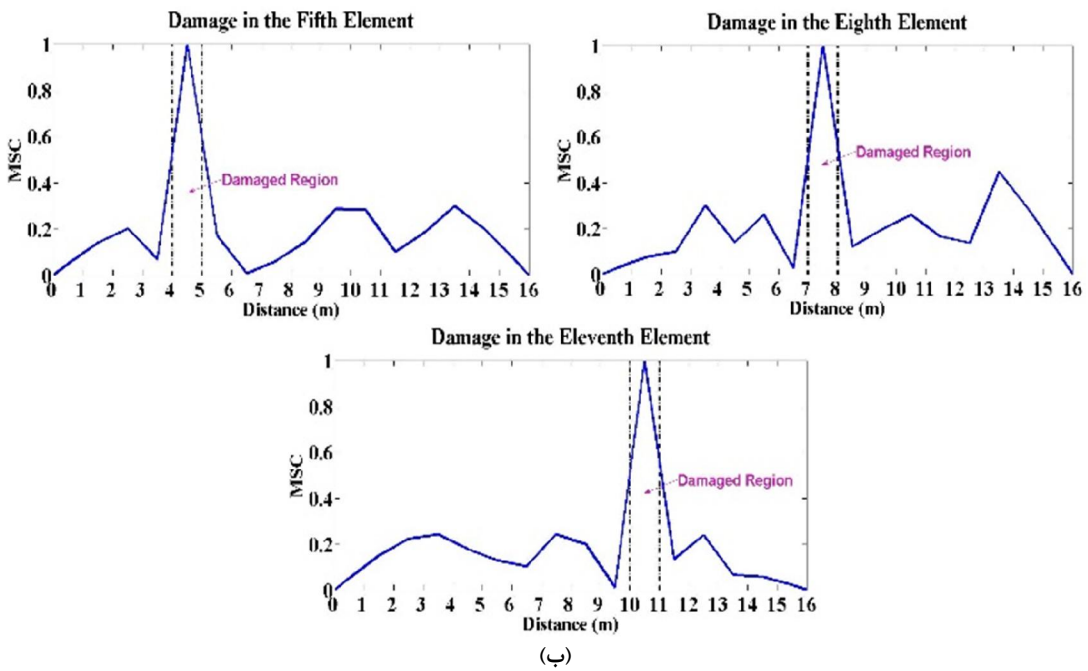
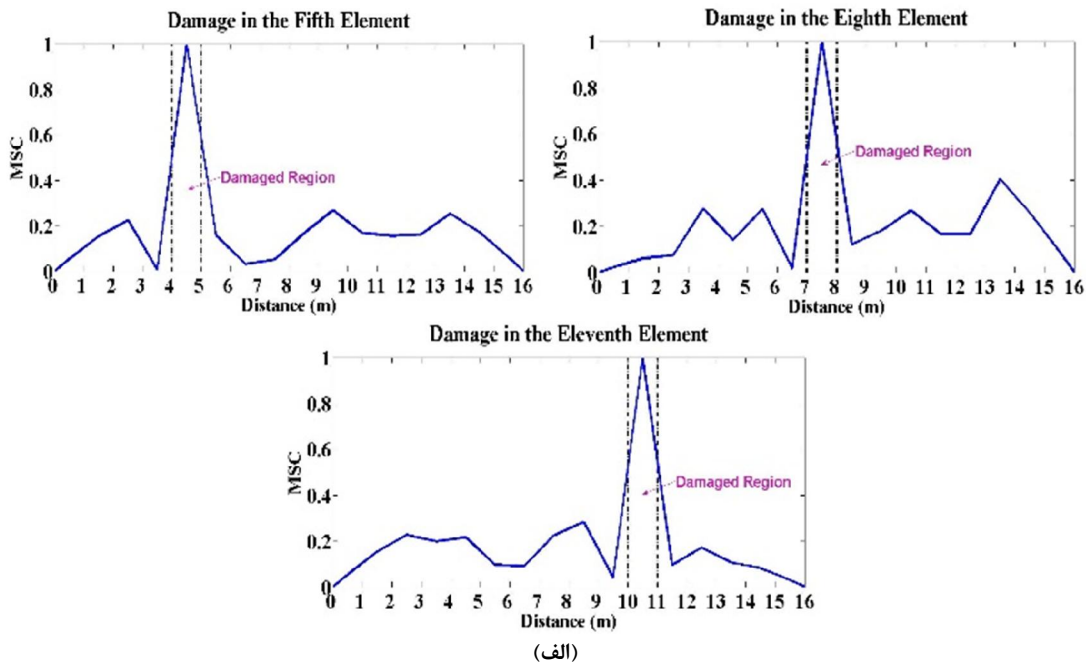


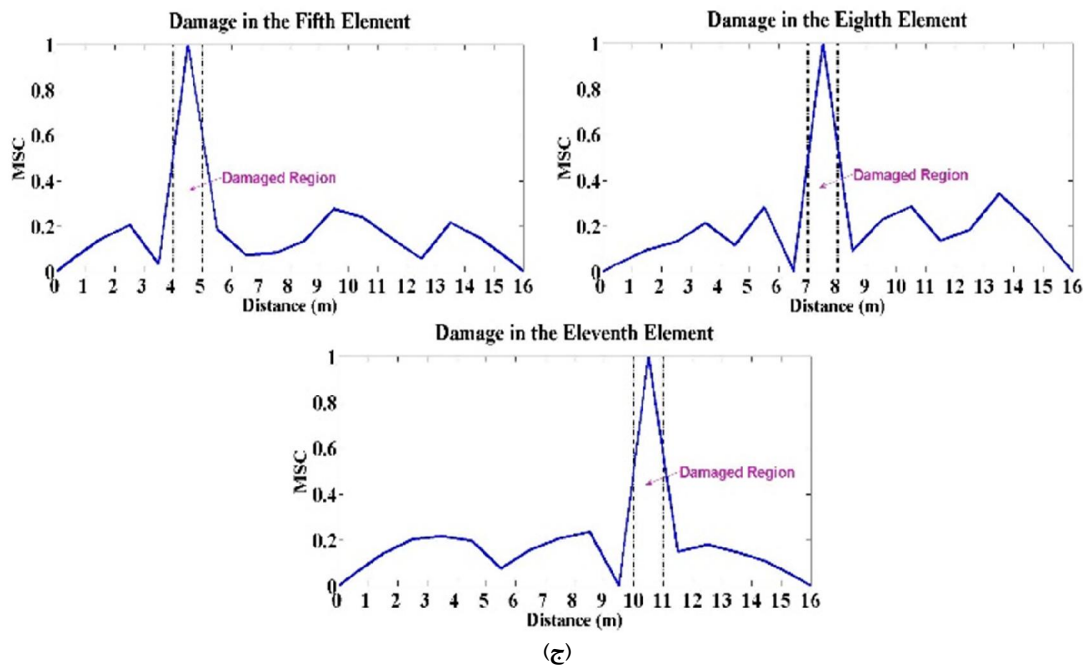
شکل ۷- شناسایی مکان ترک با شدت ۲۰٪ در المان‌های ۵، ۸ و ۱۱ با در نظر گرفتن  
الف) ۵٪، ب) ۱۰٪ و ج) ۱۵٪ نویز در اندازه‌گیری





شکل ۸- شناسایی مکان ترک با شدت ۴۰٪ در المان‌های ۵، ۸ و ۱۱ با در نظر گرفتن (الف) ۵٪، (ب) ۱۰٪ و (ج) ۱۵٪ نویز در اندازه‌گیری





شکل ۹- شناسایی مکان ترک با شدت ۶۰٪ در المان‌های ۵، ۸ و ۱۱ با در نظر گرفتن (الف) ۵٪، (ب) ۱۰٪، (ج) ۱۵٪ نویز در اندازه‌گیری

شبیه‌سازی عددی مساله توسط وسیله‌نقلیه دو محوره و پل به صورت اویلر-برنولی و ترک به صورت اثر کاهش خطی در سفتی المانی از پل در نظر 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.

#### ۴- مراجع

- [1] Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, Shevitz DW (1996) Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos National Lab., NM (United States).
- [2] Sohn H, Farrar CR, Hemez FM, Czarnecki JJ (2004) A review of structural health monitoring literature: Los Alamos National Laboratory Los Alamos, NM.
- [3] Carden EP, Fanning P (2004) Vibration based condition monitoring: a review. Struct Health Monit 3(4): 355-377.

به طور دائم سازه را در باند فرکانس مورد نظر تحریک نماید. بعلاوه، در روش‌های مرسوم شناسایی پارامترهای مودال پل که به روش‌های مستقیم شناخته می‌شوند، نیاز است که داده‌برداری توسط شتاب‌سنج‌های تعبیه شده در پل انجام پذیرد که بنابه شرایط کاری می‌تواند پرمخاطره و پرهزینه و نیازمند حضور افراد متخصص در محل بررسی باشد؛ اما با استفاده از روش پیشنهادی در تحقیق حاضر، نیاز به وسیله‌نقلیه مرجع مرتفع شده و از آنجا که داده‌برداری توسط شتاب‌سنج‌های تعبیه شده بر محور وسیله‌نقلیه انجام می‌گیرد، وسیله‌نقلیه بدون توقف از روی پل عبور می‌کند. از طرفی به دلیل متحرک بودن شتاب‌سنج، شکل مودهای حاصله از روش زمان کوتاه، به عنوان شکل مود موضعی محسوب می‌گردند لذا از میزان‌سازی مجدد به منظور استخراج شکل مودهای کلی استفاده شده است. با توجه به اینکه مشخصه‌های مربوط به شکل مود پل به عنوان شاخص مناسبی برای شناسایی آسیب محسوب می‌گردند، در اینجا از انحنای شکل مود برای تحقق این امر بهره برده شده است.



- [20] Oshima Y, Yamamoto K, 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.
- [21] Malekjafarian A, O'Brien E (2014) Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle. *Eng Struct* 81: 386-397.
- [22] Kong X, Cai C, Kong B (2014) Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system. *J Eng Mech* 141(1): 04014102.
- [23] He WY, He J, Ren WX (2018) Damage localization of beam structures using mode shape extracted from moving vehicle response. *Measurement* 121: 276-285.
- [24] He WY, Ren WX, Zuo XH (2018) Mass-normalized mode shape identification method for bridge structures using parking vehicle-induced frequency change. *Struct Control Health* 25(6): e2174.
- [25] Malekjafarian A, O'Brien EJ (2017) On the use of a passing vehicle for the estimation of bridge mode shapes. *J Sound Vib* 397: 77-91.
- [26] Yang Y, Yang JP (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.
- [27] Keenahan J, O'Brien EJ, McGetrick PJ, Gonzalez A (2013) The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping. *Struct Health Monit* 13(2): 143-157.
- [28] Tedesco JW, McDougal WG, Ross CA (1999) *Structural dynamics: theory and applications*. Addison Wesley Menlo Park, CA.
- [29] Araújo IG, Laier JE (2014) Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices. *Mech Syst Signal Process* 46(1): 129-145.
- [30] Sinha JK, Friswell M, Edwards S (2002) Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data. *J Sound Vib* 251(1): 13-38.
- [31] Shi Z, Law S, Zhang L (2000) Damage localization by directly using incomplete mode shapes. *J Eng Mech* 126(6): 656-660.
- [32] Hadjileontiadis L, Douka E, Trochidis A (2005) Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures. *Mech Syst Signal Process* 19(3): 659-674.
- [33] Fan W, 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.
- [4] Fan W, Qiao P (2011) Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Struct Health Monit* 10(1): 83-111.
- [5] Das S, Saha P, Patro S (2016) Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *J Civ Struct Health Monit* 6(3): 477-507.
- [6] Davis SL, Goldberg D, DeGood K, Donohue N, Corless J (2013) *The Fix We're In For: The State of Our Nation's Bridges*.
- [7] Pakrashi V, O'Brien E, O'Connor A (2011) A review of road structure data in six European countries. *Proc ICE Urban Des Plan* 164(4): 225-232.
- [8] Fujino Y, Siringoringo D (2011) Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies. *Struct Infrastruct E* 7(7-8): 597-611.
- [9] Wang L, Chan TH (2009) Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring. *QUT Con Proc*.
- [10] Seo J, Hu JW, Lee J (2015) Summary review of structural health monitoring applications for highway bridges. *J Perform Constr Fac* 30(4): 04015072.
- [11] Yang YB, Lin C, Yau J (2004) Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. *J Sound Vib* 272(3): 471-493.
- [12] Yang Y, Lin C (2005) Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications. *J Sound Vib* 284(1): 205-226.
- [13] Lin C, Yang Y (2005) Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification. *Eng Struct* 27(13): 1865-1878.
- [14] Pandey A, Biswas M, Samman M (1991) Damage detection from changes in curvature mode shapes. *J Sound Vib* 145(2): 321-332.
- [15] Zhu X, Law S (2006) Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history. *Int J Solids Struct* 43(7): 2299-2317.
- [16] Arora V, Singh S, Kundra T (2009) Damped model updating using complex updating parameters. *J Sound Vib* 320(1): 438-451.
- [17] Farrar C, James III GH (1997) System identification from ambient vibration measurements on a bridge. *J Sound Vib* 205(1): 1-18.
- [18] Zhang Y, Wang L, Xiang Z (2012) Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle. *J Sound Vib* 331(2): 291-307.
- [19] Yang Y, Li Y, Chang K (2014) Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study. *Smart Struct Syst* 13(5): 797-819.

[35] O'Brien EJ, Malekjafarian A (2016) A mode shape-based damage detection approach using laser measurement from a vehicle crossing a simply supported bridge. *Struct Control Health* 23(10): 1273-1286.

[34] Li H, He CJ, Ji JL, Hui W, Hao CZ (2005) Crack damage detection in beam-like structures using RBF neural networks with experimental validation. *Int J Innov Comput I* 1(4): 625-634.