



صحه‌گذاری تجربی شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده از نسبت انتقال پذیری وسیله‌نقلیه عبوری

سیدمازیار مرعشی^۱، محمدهادی پاشائی^{۱*}، محمدمهدی خطیبی^۲، محمد عبدالهی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۱۴

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

کلمات کلیدی:

شکل مود پل

پایش سلامت

شناسایی غیرمستقیم

نسبت انتقال پذیری

صحه‌گذاری تجربی

خلاصه: استفاده از داده‌های ارتعاشی یکی از راه‌های پایش سلامت پل می‌باشد که معمولاً پرهزینه و زمان‌بر است. پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه در حال عبور از پل، شامل پاسخ ارتعاشی پل نیز می‌باشد که می‌توان از آن برای استخراج پارامترهای مودال پل بهره برد. در این مقاله، به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل از نسبت انتقال‌پذیری پاسخ وسیله‌نقلیه استفاده شده است. با نصب شتاب‌سنج بر روی محورهای وسیله‌نقلیه، اندازه‌گیری شتاب در حین حرکت صورت می‌گیرد و نیازی به توقف وسیله‌نقلیه روی پل ندارد. از طرفی، در اغلب روش‌های موجود فرض بر آن است که نیروی تحریک به صورت نویز سفید باشد اما در روش حاضر خصوصیات نیروی تحریک در نظر گرفته نمی‌شود که این مورد از دیگر مزایای این روش است. در شبیه‌سازی عددی، پل به صورت اولبر برنولی و وسیله‌نقلیه به صورت چهار درجه آزادی مدل شده‌اند. با حل هم‌زمان معادله برهم‌کنش پل با وسیله‌نقلیه، شتاب کلیه درجات آزادی حاصل آمده است. در ادامه شکل مود پل با اعمال روش انتقال‌پذیری زمان کوتاه بر داده شتاب‌محور وسیله‌نقلیه استخراج شده است. از آنجا که عملکرد روش‌های غیرمستقیم در شرایط واقعی با موانع و چالش‌های بسیار همراه است، در ادامه این تحقیق، مجموعه‌ای برای صحه‌گذاری تجربی روش پیشنهادی به صورت آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی و نیز آزمایشگاهی دلالت بر توانایی روش حاضر برای شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل دارد.

۱- مقدمه

تخمین شکل مودهای پل در بررسی رفتار دینامیکی آن حائز اهمیت است. زیرا ناپیوستگی شکل مود در نقاط دارای آسیب اتفاق می‌افتد که شامل ناپیوستگی شیب در نقاط مربوطه می‌باشد. از تغییر انحنای شکل مود می‌توان برای تشخیص ناپیوستگی‌ها استفاده نمود [۱، ۲]. همچنین، شکل مودهای پل می‌تواند به‌عنوان ابزاری مهم در به‌روزرسانی مدل پل مورد استفاده قرار گیرد [۳].

ژانگ و همکارانش [۴] با استفاده از شتاب‌سنج و لرزاننده^۱ عبور وسیله‌نقلیه از پل را مدل‌سازی نمودند. نتایج حاکی از آن است که اندازه طیف بدست‌آمده از امپدانس نقطه‌ای تقریباً با مربع شکل مود^۲ متناسب است که می‌تواند برای تشخیص آسیب بکار رود. اگرچه هدف اصلی این روش، تخمین شکل مودهای پل نیست اما اولین کاربرد روش‌های غیرمستقیم برای شناسایی مشخصه‌های مرتبط با شکل

مود می‌باشد.

یانگ و همکارانش [۵] روشی تئوری برای شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل معرفی نمودند. آن‌ها نشان دادند که، دامنه‌ی بخشی از پاسخ وسیله‌نقلیه 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^۳ پاسخ فیلترشده میان گذر^۴ انجام شده است.

اوشیما و همکارانش [۶] روشی را برای شناسایی آسیب پل طرح‌ریزی نمودند که شامل تخمین شکل مودهای پل از پاسخ ارتعاشی وسیله‌نقلیه متحرک می‌باشد. در این روش، شکل مودهای حاصل از روش تجزیه مقدار ویژه به منظور تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گرفته‌است. این آزمایش توسط دو یدک‌کش سنگین دو محوره و چند وسیله‌نقلیه شناسایی تک‌محوره صورت گرفته است. نتایج نشان

1 Shaker

2 Mode Shape Square

3 Hilbert Transform

4 Band-Pass Filter

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mpashaei@nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



می‌دهد که میانگین مقادیر معیار اطمینان مودال^۱ به تعداد وسایل نقلیه تک محوره وابسته است. هنگامی که نوپز اندازه‌گیری بزرگتر از یک درصد باشد، این روش نیازمند تعداد اندازه‌گیری‌های بی‌شماری است که یکی از موانع اصلی برای کاربرد عملی این روش می‌باشد.

ملک‌جعفریان و اوبرایان [۷] استفاده از روش تجزیه حوزه فرکانسی زمان کوتاه^۲ برای شناسایی شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ اندازه‌گیری‌شده 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. اگر نوپز و سرعت وسیله‌نقلیه پایین باشد، شکل مودها می‌توانند با دقت قابل قبولی بدست آیند. همچنین اعمال رفت و آمد بر روی پل می‌تواند حساسیت روش به نوپز را کاهش دهد.

هی و همکارانش [۸] با استفاده از تبدیل هیلبرت، شکل مود مرتبه اول با وضوح بالا را استخراج نموده‌اند و انحنای شکل مود موضعی^۳ در محدوده آسیب به منظور افزایش توانایی غلبه بر نوپز را معرفی نمودند. در تحقیقی دیگر [۹]، آن‌ها روشی برای شناسایی شکل مودهای نرمال‌شده به جرم بر اساس ویژگی تحمل بار پیشنهاد دادند. اگرچه این روش، شکل مودهایی با وضوح بالا بدست می‌آورد اما سفتی وسیله‌نقلیه را بی‌نهایت در نظر گرفته است و در حین داده‌برداری، وسیله نقلیه روی پل به حالت سکون باشد.

الگوریتم دیگری نیز برای تخمین شکل مودهای پل با استفاده از پاسخ وسیله نقلیه عبوری توسط ملک‌جعفریان و اوبرایان [۱۰] ارائه گردیده است. در این روش از یک سیستم یدک و یدک‌کش با اعمال تحریک خارجی به پل به‌منظور رساندن انرژی لازم برای ارتعاش در فرکانس‌های مورد نظر، استفاده شده است.

اخیراً، یانگ و همکارانش [۱۱]، مروری جامع بر شناسایی غیرمستقیم پارامترهای مودال و تشخیص آسیب در پل‌ها از وسیله‌نقلیه عبوری ارائه داده‌اند و متذکر شدند که باید بررسی‌های بیشتری پیرامون استفاده از مدل چند درجه آزادی برای وسیله‌نقلیه در شبیه‌سازی عددی، تست در مقیاس آزمایشگاهی و نیز آزمایش میدانی انجام پذیرد.

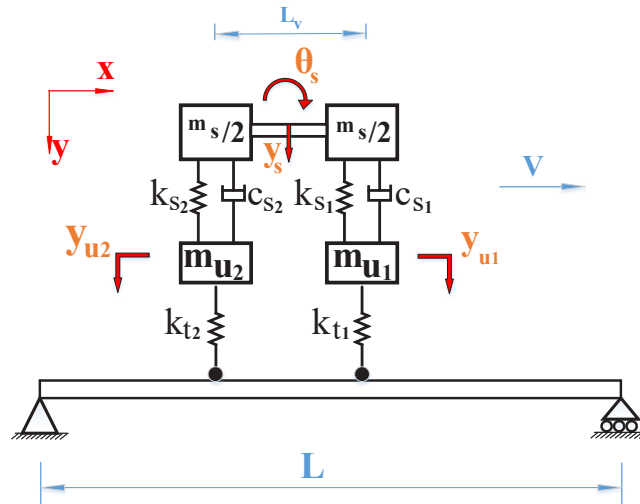
- 1 Modal Assurance Criterion (MAC)
- 2 Short Time Frequency Domain Decomposition (STFDD)
- 3 Regional mode shape curvature

اگر چه تحقیق ژانگ و همکارانش [۴] می‌تواند به‌عنوان اولین تلاش در شناسایی غیرمستقیم شکل مودهای پل به حساب آید، ولی مبتنی بر به‌کارگرفتن وسیله‌نقلیه محرک و اندازه‌گیری نیروی تحریک می‌باشد که ممکن است در حالت واقعی قابل اجرا نباشد. در این راستا، ایده‌های دیگری [۱۲] نیز ارائه گردیده‌اند که فقط بر اساس پاسخ اندازه‌گیری‌شده یک وسیله‌نقلیه عبوری می‌باشد. روش ارائه‌شده توسط یانگ و همکارانش [۵]، شکل مودهایی با وضوح بالا و دقت قابل قبول، به‌خصوص برای اولین شکل مود، بدست آورده است. اما، عملکرد این روش در حضور نوپز نیاز به بررسی دارد. از طرف دیگر، روش‌های ارائه‌شده توسط اوشیما و همکارانش [۶] و ملک‌جعفریان و اوبرایان [۷] نشان‌دهنده حساسیت بالا به نوپز است که یکی از خصوصیات ذاتی یک سیستم در اندازه‌گیری واقعی می‌باشد. اگرچه کنگ و همکارانش [۱۲]، از انتقال‌پذیری به منظور شناسایی آسیب در پل استفاده نمودند اما توقف حداقل یکی از دو وسایل نقلیه در حین داده‌برداری لازم می‌باشد.

به نظر می‌رسد که روش‌های پایش غیرمستقیم پل که تمرکز بر شناسایی شکل مودهای پل داشته، دارای قابلیت‌های بالقوه بوده و از مزایای بسیاری برای یافتن و مکان‌یابی آسیب برخوردار هستند. اما در حال حاضر این روش‌ها به‌علت کمبود مطالعات آزمایشگاهی برای نشان‌دادن برخی مشکلات عملی، محدود می‌باشند. بر اساس مطالعات موجود، می‌توان نتیجه گرفت که این روش‌ها نیاز به بهبود قابل ملاحظه و به دنبال آن اعتبارسنجی داشته تا در عمل بتواند قابلیت اجرای خوبی داشته باشد.

از آنجاکه در میان روش‌های موجود، صرفاً روش بر مبنای انتقال‌پذیری مستقل از فرض نوپز سفید برای تحریک است و کارایی مناسبی در حضور نوپز دارد، لذا در این مقاله، از روش بر مبنای انتقال‌پذیری زمان کوتاه [۱۳] استفاده می‌گردد تا شکل مود پل بدست آید. در این روش اندازه‌گیری شتاب در حین حرکت وسیله نقلیه صورت می‌گیرد و نیازی به توقف وسیله‌نقلیه نمی‌باشد؛ همچنین، با توجه به استفاده از نسبت انتقال‌پذیری نیازی به فرض نوپز سفید در تحریک نمی‌باشد.

به منظور ارزیابی عددی روش، یک پل دوسر مفصل به صورت المان محدود و وسیله‌نقلیه به صورت یک سیستم چهاردرجه آزادی جرم-فنر-دمپر مدل شده است. با حل هم‌زمان مدل پل-وسيلة‌نقلیه،



شکل ۱. مدل برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل

Fig. 1. Vehicle bridge interaction model

ترتیب؛ جرم بدنه، جرم اکسل، سفتی سیستم تعلیق، سفتی لاستیک و میرایی سیستم تعلیق می‌باشند. y_u به عنوان جابجایی عمودی اکسل و y_s و θ_s به ترتیب به عنوان جابجایی عمودی بدنه و چرخش آن تعریف شده‌اند. سرعت وسیله‌نقلیه نیز، مقدار ثابت V و فاصله دو محور از هم L_v می‌باشد. وسیله‌نقلیه در زمان صفر در ابتدای پل طوری قرار دارد که لاستیک عقب آن بر روی تکیه‌گاه سمت چپ در تماس است. همچنین فرض تعادل استاتیکی برای سیستم در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱ و پارامترهای مذکور، معادلات حرکت وسیله‌نقلیه به روش تعادل نیرو بدست آمده و می‌تواند به فرم ماتریسی زیر بیان شود:

$$[M_v]\{\ddot{Y}_v\} + [C_v]\{\dot{Y}_v\} + [K_v]\{Y_v\} = \{f_v\} \quad (1)$$

که $\{f_v\}$ بردار نیروی برهم‌کنش وارد بر وسایل‌نقلیه و $\{Y_v\}$ ، $\{\dot{Y}_v\}$ 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 نیز به صورت یک تیر اویلر برنولی دوسر مفصل با طول L در نظر گرفته‌شده و جرم واحد طول (\bar{m}) ، مدول الاستیک (E) و ممان اینرسی مقطع آن (I) ثابت فرض شده است. برای مدل کردن

پاسخ وسیله‌نقلیه محاسبه می‌گردد. با کمک سیگنال شتاب کوتاه‌شده، نسبت انتقال‌پذیری محاسبه و روش تجزیه مقدار تکین بر ماتریس‌های انتقال‌پذیری اعمال گشته و شکل مود پل بدست آمده است. در ادامه، مجموعه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و پیاده‌سازی شده است تا عملکرد روش را در شرایط واقعی مورد بررسی قرار دهد.

۲- تئوری شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل

در این بخش، تئوری و روش به‌کاررفته در تحقیق حاضر به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده از شتاب ثبت‌شده از وسیله‌نقلیه عبوری پی‌ریزی می‌شود. در ابتدا با استفاده از روش اجزاء محدود، مدل‌سازی برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل انجام می‌گیرد. پس از آن تئوری روش انتقال‌پذیری به عنوان یک روش آنالیز مودال فقط خروجی به طور مختصر تشریح و در ادامه آن، تخمین شکل مودهای پل به روش زمان کوتاه مطرح می‌گردد.

در این تحقیق به منظور بررسی عددی مساله برهم‌کنش وسیله‌نقلیه با پل از روش اجزاء محدود بهره گرفته شده است [۱۴]. مدل وسیله‌نقلیه به صورت یک سیستم چهار درجه آزادی مانند شکل ۱ انتخاب شده است. کلیه معادلات برهم‌کنش پل و وسیله‌نقلیه به صورت یک دستگاه معادلات وابسته در نظر گرفته می‌شود که حل آن در هر گام زمانی انجام می‌پذیرد.

در شکل فوق، 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

پذیری برای بدست آوردن فرکانس طبیعی و شکل مود پل بهره گرفته می شود. چگالی طیف توان انتقال پذیری^۲ به صورت رابطه (۴) تعریف می گردد [۱۷]:

$$T_{xoxj}^k(i\omega) = \frac{S_{xoxk}(i\omega)}{S_{xjxk}(i\omega)} \quad (4)$$

در رابطه اخیر، چگالی طیف توان خروجی های X_k و X_o ، با نام S_{xoxk} ، به صورت نسبت چگالی طیف توان نقطه o به نقطه مرجع k تعریف شده است. همچنین، چگالی طیف توان خروجی های X_j و X_k با نام S_{xjxk} به طور مشابه قابل محاسبه است. i نیز عدد موهومی $\sqrt{-1}$ و ω فرکانس مورد بررسی می باشد.

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 می باشد و سهم سایر مودهای ارتعاشی قابل صرف نظر کردن است [۱۷] لذا رابطه زیر قابل دستیابی است:

$$\lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} T_{xoxj}^k(i\omega) = \lim_{i\omega \rightarrow i\omega_l} \frac{S_{xoxk}(i\omega)}{S_{xjxk}(i\omega)} = \frac{\psi_{ol}^*}{\psi_{jl}^*} \quad (5)$$

در رابطه فوق، θ_{kl} به عنوان عنصری از بردار شکل مود می باشد که k نماد درجه آزادی و l نماد شکل مود مربوطه است. ω_l نیز به عنوان فرکانس طبیعی مود l ام در نظر گرفته می شود. به روشی مشابه، با تعریف نقطه مرجعی دیگر مانند z ، انتقال پذیری به سمت مقداری مشابه میل می نماید. اکنون با تغییر نقطه o ، ماتریس انتقال پذیری به صورت زیر قابل بیان است:

$$T_{xoxj}^{z_i}(i\omega) = \begin{bmatrix} T_{x_{o1}x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_{o1}x_j}^{z_2}(i\omega) \\ T_{x_{o2}x_j}^{z_1}(i\omega) & T_{x_{o2}x_j}^{z_2}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (6)$$

با انجام تجزیه مقدار تکین، دومین مقدار تکین این ماتریس به سمت صفر میل خواهد کرد. بنابراین، معکوس دومین مقدار تکین

پل از المان تیر^۱ با دو درجه آزادی استفاده می شود. این المان شامل دوگره است که هر گره دارای دو درجه آزادی جابجایی و دورانی می باشد. تغییر شکل تیر به وسیله این درجه آزادی ها بیان می شود [۱۵].

با توجه به تعداد المانهای استفاده شده برای مدل سازی تیر و نیز مکان حضور محورهای وسیله نقلیه بر روی آن، معادله حرکت پل می تواند به صورت رابطه زیر بیان شود:

$$[M_b]\{\ddot{Y}_b\} + [C_b]\{\dot{Y}_b\} + [K_b]\{Y_b\} = [N_b]\{f_{int}\} \quad (2)$$

که $[M_b]$ ، $[C_b]$ و $[K_b]$ به ترتیب ماتریس های کلی جرم، میرایی و سفتی پل و $\{Y_b\}$ بردار کلی جابجایی و چرخش گره می باشند. $\{\ddot{Y}_b\}$ و $\{\dot{Y}_b\}$ به ترتیب مشتق اول (سرعت) و مشتق دوم (شتاب) جابجایی و چرخش گره می باشد و $[N_b]\{f_{int}\}$ نیز بردار کلی نیروی وارده بر گره های پل است. $[N_b]$ نیز ماتریسی می باشد که نیروهای برهم کنش اعمالی بر المان های تیر را به نیروهای گره ای معادل بسط می دهد.

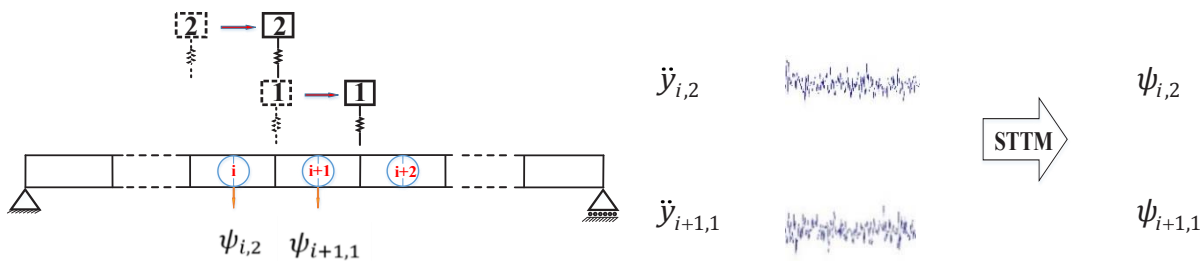
با ترکیب معادلات (۱) و (۲)، معادله به هم وابسته برهم کنش وسیله نقلیه با پل به صورت رابطه زیر بازنویسی می گردد:

$$[M_T]\{\ddot{Y}_T\} + [C_T]\{\dot{Y}_T\} + [K_T]\{Y_T\} = \{F_T\} \quad (3)$$

که $[M_T]$ ، $[C_T]$ و $[K_T]$ به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سفتی کل سیستم برهم کنش پل با وسیله نقلیه، $\{F_T\}$ بردار مربوط به نیروی برهم کنش و $\{Y_T\}$ بردار جابجایی می باشد.

پاسخ معادله (۳) با استفاده از روش انتگرال گیری ویلسون تتا قابل دستیابی است [۱۶]. مقدار بهینه برای پایداری غیرمشرط در انتگرال گیری ویلسون تتا مقدار $\theta_{wilson} = 1.420815$ و کلیه شرایط اولیه صفر در نظر گرفته می شود [۱۶].

پس از بدست آوردن شتاب کلیه درجات آزادی سیستم برهم کنش از جمله محور وسیله نقلیه، نیاز است تا شناسایی پارامترهای مودال پل با استفاده از داده شتاب انجام پذیرد. بدین منظور از روش انتقال



شکل ۲. محاسبه شکل مود به کمک اندازه‌گیری انتقال‌پذیری زمان کوتاه [۱۳]

Fig. 2. Mode shape extraction by short time transmissibility measurement

برای دستیابی به بردار شکل مودهای کلی باید مقیاس‌گذاری انجام گیرد. روند مقیاس‌گذاری بدین گونه است که اولین بردار شکل مود موضعی به عنوان شکل مود کلی در نظر گرفته می‌شود و سایر شکل مودهای کلی از رابطه زیر قابل محاسبه هستند [۱۳]:

$$\varphi = \left\{ \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \psi_{3,1} \frac{\varphi_2}{\psi_{2,2}} \quad \dots \quad \psi_{i+1,1} \frac{\varphi_i}{\psi_{i,2}} \right\}^T \quad i=3:n+1 \quad (8)$$

که φ_i شکل مود کلی مربوط به وسط قسمت i ام پل و $\varphi_{i+1,1}$ و $\varphi_{i,2}$ به ترتیب شکل مود موضعی قسمت $i+1$ و i می‌باشد که از اولین و دومین شتاب‌سنج بدست آمده است [۱۳].

۳- شبیه‌سازی

در این بخش، روش موردنظر [۱۳] برای شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل وسیله‌نقلیه به صورت یک سیستم چهار درجه آزادی و مدل پل به صورت یک تیر اویلر-برنولی خواهد بود. قابل ذکر است که برای بدست آوردن شکل مود پل در تمام مراحل شبیه‌سازی از روش اجزاء محدود، برنامه‌ها در دامنه نرم‌افزار متلب^۱ نوشته شده است.

به منظور بررسی عددی شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده داده‌های شتاب حاصل از دو محور وسیله‌نقلیه، پلی از مرجع [۱۸] با مشخصات مندرج در جدول ۱ در نظر گرفته شده است. پل موردنظر به صورت اویلر-برنولی فرض و با استفاده از روش اجزاء

می‌تواند برای بدست آوردن فرکانس طبیعی سیستم بکار گرفته شود [۱۷]. تجزیه مقدار تکین ماتریس انتقال‌پذیری $T_{x_{o_i}x_j}^{Z_i}(i\omega)$ در رابطه (۷) تعریف می‌گردد:

$$\left[T_{x_{o_i}x_j}^{Z_i}(i\omega) \right] = \left[U^j(i\omega) \right]_{2 \times 2} \left[\Lambda^j(i\omega) \right]_{2 \times 2} \left[V^j(i\omega) \right]_{2 \times 2}^* \quad (7)$$

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 می‌باشند. 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. از طرفی، در نزدیکی فرکانس طبیعی، اولین بردار تکین در ماتریس $[U(i\omega)]$ از رابطه (۷)، متناسب با شکل مود سیستم می‌باشد [۱۷].

از آنجاکه در روش مورد استفاده در این تحقیق صرفاً از دو شتاب‌سنج نصب‌شده بر روی وسیله‌نقلیه متحرک برای اندازه‌گیری شتاب پل استفاده می‌شود، بنابراین امکان استفاده مستقیم از رابطه (۷) برای محاسبه شکل مود وجود ندارد در نتیجه در این بخش با تقسیم‌بندی داده‌های شتاب به بازه‌های زمانی، امکان محاسبه شکل مود فراهم گردد [۷]. برای این امر، داده دریافت‌شده از دو محور متوالی در بازه‌های زمان کوتاه در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲). فاصله بین دو محور نیز برای تقسیم‌بندی پل مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعد از عبور وسیله‌نقلیه از پل، تمام بردارهای شکل مود موضعی بدست می‌آیند. از آنجاکه بردارهای شکل مود موضعی به طور هم‌زمان بدست نیامده‌اند،

1 MATLAB

جدول ۱. مشخصات پل

Table 1. Properties of the bridge

مقدار	نام گذاری	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)
۰/۰۳	ζ	ضریب میرایی

جدول ۲. مشخصات ارتعاشی وسیله نقلیه [۱۸]

Table 2. Properties of the vehicle model

مقدار	نام گذاری	مشخصات
۱۶۶۰۰	m_s	جرم بدنه (kg)
۷۰۰	m_{u1}, m_{u2}	جرم محور (kg)
4×10^5	k_{s1}, k_{s2}	سفتی تعلیق (N/m)
1.0×10^3	c_{s1}, c_{s2}	میرایی تعلیق (N.s/m)
$1/75 \times 10^6$	k_{t1}, k_{t2}	سفتی لاستیک (N/m)
۲	v	سرعت وسیله نقلیه (m/s)
۵	L_v	فاصله دو محور (m)

محدود مدلسازی شده است.

مقادیر به کار گرفته شده برای مشخصات ارتعاشی وسیله نقلیه نیز در جدول ۲ آورده شده است [۱۸].

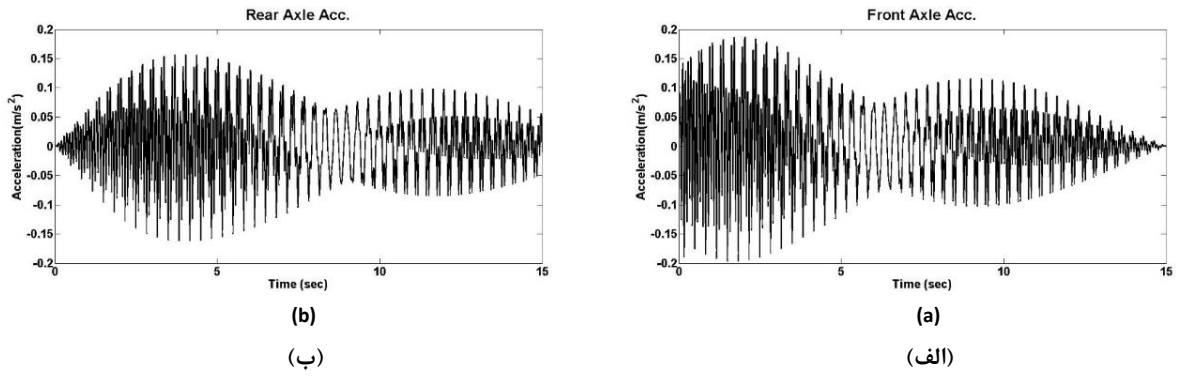
با توجه به فاصله دو محور از هم، تعداد ۷ المان در مدل اجزاء محدود برای تیر در نظر گرفته و برای حل مساله برهم کنش وسیله نقلیه با پل از بازه های زمانی به مقدار ۰/۰۰۱ ثانیه، استفاده شده است. بر روی هر یک از محورهای وسیله نقلیه، یک شتاب سنج وظیفه ثبت داده ها را برعهده دارد. با توجه به مقدار فاصله هر محور از هم ($L_v = 5m$)، تعداد ۷ نقطه برای شکل مود حاصل خواهد آمد که هر یک از این نقاط مربوط به وسط قسمتی از پل می باشد که دو محور متوالی از آن گذر کرده است (رابطه (۸)).

با حل معادلات برهم کنش (۳)، شتاب دو محور حاصل می گردد. قسمت های (الف) و (ب) در شکل ۳، به ترتیب مربوط به شتاب اولین

و دومین محور می باشد.

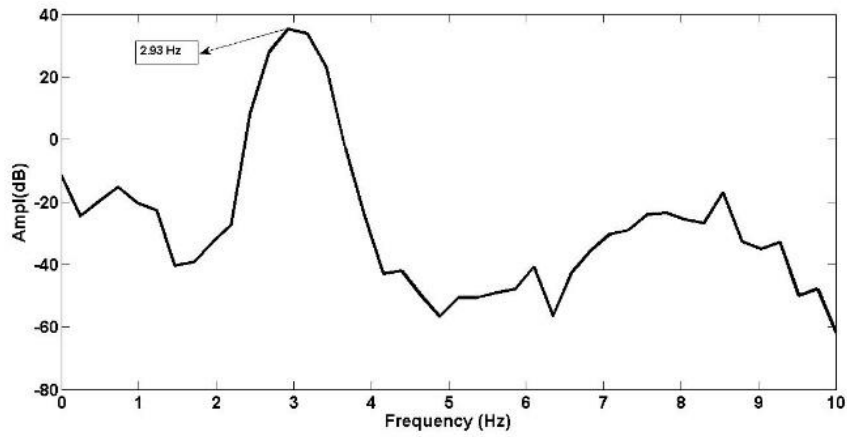
شناسایی پارامترهای مودال با استفاده از تجزیه مقدار تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال پذیری انجام می گیرد [۱۷]. به منظور محاسبه فرکانس های طبیعی سیستم، معکوس دومین مقدار تکین بر حسب ω ترسیم می شود. قله های این نمودار همان فرکانس های طبیعی هستند. به عنوان مثال، شکل ۴ برای اولین مرحله از اعمال انتقال پذیری بر روی داده های شتاب آورده شده است.

اولین بردار تکین در ماتریس $[U(i\omega)]$ از رابطه (۷) متناسب با شکل مود سیستم می باشد. اما با توجه به حرکت وسایل نقلیه و به تبع آن شتاب سنج های روی آن، می بایست با تقسیم بندی داده شتاب اندازه گیری شده به بازه های زمانی، امکان محاسبه شکل مود فراهم گردد. با استفاده از رابطه (۸) شکل مود تیر از روش غیرمستقیم حاصل آمده و با شکل مود دقیق مقایسه شده است (شکل ۵).



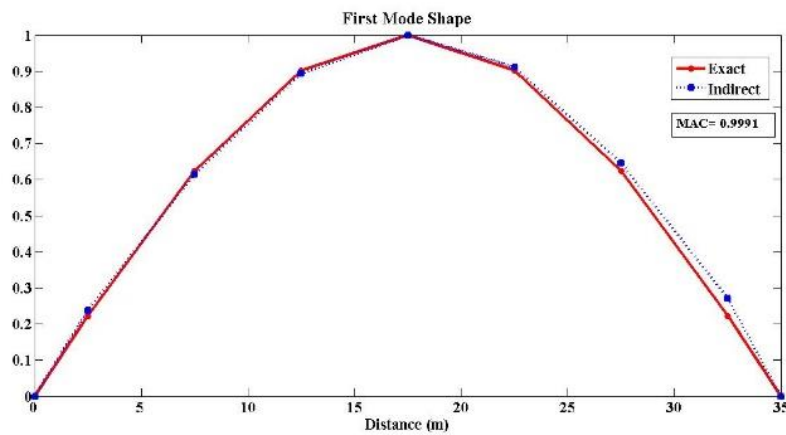
شکل ۳. شتاب (الف) اولین و (ب) دومین محور وسیله نقلیه

Fig. 3. Acceleration of the (a) first and (b) second axle of the vehicle



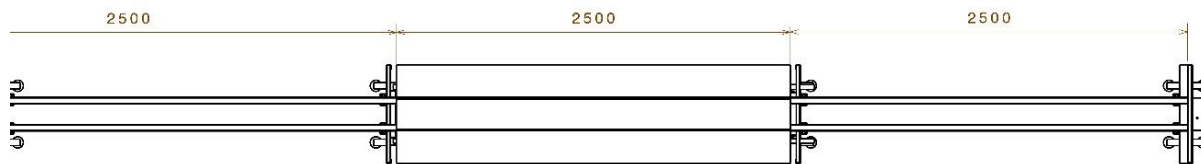
شکل ۴. معکوس دومین مقدار تکین بر حسب ω برای مرحله اول

Fig. 4. Inverse of the second singular value versus ω in the first stage



شکل ۵. اولین شکل مود پل از روش غیرمستقیم و مقایسه آن با حل تحلیلی

Fig. 5. The first mode shape of the bridge from indirect method and analytical solution



شکل ۶. نمای بالا از مدل کلی مجموعه مورد آزمایش در نرم افزار کتیا

Fig. 6. Top view of the laboratory model in CATIA



شکل ۷. صفحه آلومینیومی با تکیه گاه ساده

Fig. 7. Simply supported Aluminum plate

جدول ۳. مشخصات صفحه آلومینیومی

Table 3. The properties of the Aluminum plate

مقدار	مشخصات
۲/۵	طول (m)
۰/۱۶۲۵	عرض (m)
۳	ضخامت (mm)

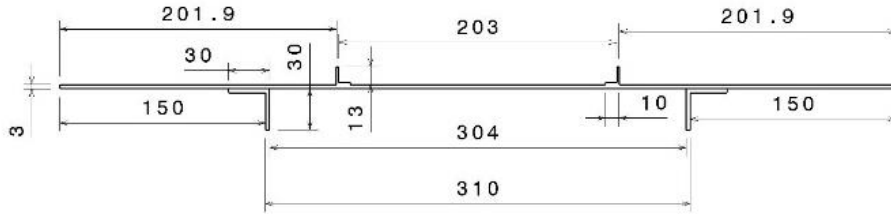
وسيله نقلیه مورد نظر نیز دارای دو درجه آزادی بوده که توسط تسمه لاستیکی به موتور الکتریکی متصل می شود. موتور الکتریکی از نوع سه فاز وظیفه چرخاندن پولی و به دنبال آن حرکت تسمه لاستیکی را برعهده دارد. با حرکت تسمه لاستیکی می توان حرکت وسیله نقلیه را کنترل نمود. در بالای سازه مورد آزمایش یک ریل آلومینیومی قرار دارد تا سیم های شتاب سنج توسط قرقره هایی بتوانند به راحتی در جهت حرکت وسیله نقلیه جابجا شوند.

شکل ۷ صفحه آلومینیومی مورد نظر را نشان می دهد. این صفحه که به عنوان پل در نظر گرفته می شود دارای دو تکیه گاه ساده بوده و مشخصات مندرج در جدول ۳ برای ساخت آن در نظر گرفته شده است. شکل ۸ سطح مقطع صفحه آلومینیومی را در نرم افزار کتیا نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، دو عدد نبشی

۴- تست

کارآمدی هر روش نیاز به بررسی آن روش در محیط عملی دارد. در این بخش به منظور اعتبارسنجی روش [۱۳]، ساخت یک پل در مقیاس آزمایشگاهی پی ریزی شده است. به طور خلاصه در این فصل شکل مود پل آزمایشگاهی با روش غیرمستقیم استخراج و با شکل مود حاصل از آزمایش کلاسیک چکش مقایسه می گردد.

نمای بالا از مجموعه مورد آزمایش را در نرم افزار کتیا نشان می دهد که طول تقریبی آن ۷/۵۰ متر و عرض آن ۱ متر می باشد. این مجموعه ۷/۵ متری از سه بخش تشکیل شده است. در بخش اول که طول آن قریب ۲/۵ متر است، وسیله نقلیه از سرعت صفر شروع به حرکت نموده تا به سرعت مورد نظر برسد. وسیله نقلیه پس از آن با سرعت ثابت وارد بخش میانی سازه یا همان پل می شود. این بخش که از یک صفحه آلومینیومی تشکیل شده است به طول ۲/۵ متر می باشد. سرانجام وسیله نقلیه پس از عبور از بخش میانی به بخش انتهایی می رسد تا بتواند با طی مسافت نهایتاً متوقف گردد. این سازه مورد آزمایش توسط چهار ستون نگهداری می شود. این ستونها با استفاده از قطعات لاستیکی روی زمین قرار گرفته اند تا مجموعه کاملاً روی زمین تراز شده و از ارتعاشات مزاحم نیز جلوگیری شود.



شکل ۸. نمای سطح مقطع صفحه آلومینیومی در نرم افزار کتیا

Fig. 8. The cross section of the Aluminum plate in CATIA



شکل ۹. نمای مختلف از تکیه گاه مفصلی

Fig. 9. Different views of the pinned support

که شکل ۱۱ نمایی از آن را نشان می دهد. یک پولی هرزگرد نیز در آخرین پایه، وظیفه نگهداری طرف دیگر تسمه لاستیکی را به عهده دارد.

شکل ۱۲ نیز نمایی از آخرین پایه نگهدارنده را نشان می دهد که یک مکانیزم ساده نیز برای سفت کن کردن تسمه لاستیکی در این شکل به تصویر درآمده است.

همانطور که پیش تر بیان شد، در مجموعه مورد آزمایش، از یک بخش به عنوان شتاب دهنده برای وسیله نقلیه استفاده می شود. این بخش توسط دو نبشی فولادی قبل از ورود وسیله نقلیه بر روی پل طوری جانمایی شده است که فاصله بین دو نبشی به اندازه فاصله بین دو چرخ از یک محور وسیله نقلیه می باشد. به همین صورت برای توقف وسیله نقلیه نیز، بخشی در مجموعه مورد آزمایش برای توقف مورد نیاز است که این بخش بعد از صفحه آلومینیومی قرار داده شده است. شکل ۱۳ تصویری از کل مجموعه مورد آزمایش را نشان می دهد که دو بخش مذکور نیز در این شکل مشاهده می شود. وسیله نقلیه در این

آلومینیومی به عنوان مسیر حرکت وسیله نقلیه در بالای این صفحه نصب شده است. همچنین به منظور ایجاد تکیه گاه ساده، دو عدد نبشی آلومینیومی دیگر در زیر صفحه تعبیه شده که از سمت راست مفصل و از سمت چپ بر روی تکیه گاه غلطکی قرار داده شده است.

به منظور ایجاد تکیه گاه مفصلی از یک پین با حالت گوه ای استفاده شده است. حالت گوه ای پین باعث جلوگیری از ارتعاشات ناخواسته پل شده و بهترین شرایط را برای ایجاد تکیه گاه مفصلی مهیا می نماید. تصاویر مربوط به تکیه گاه مفصلی در شکل ۹ مشاهده می شود.

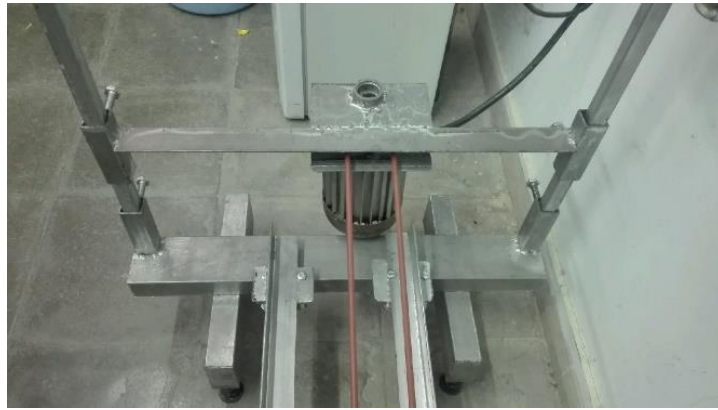
تکیه گاه غلطکی نیز به کمک دو عدد یاتاقان به همراه پین های مربوطه، طوری طراحی شده است که تیغه های آلومینیومی زیرین پل بر روی این دو پین قرار می گیرد. شکل ۱۰ نمای مختلف از این تکیه گاه را نشان می دهد.

به منظور به حرکت درآوردن وسیله نقلیه، یک موتور سه فاز وظیفه ایجاد کشش در تسمه لاستیکی را به عهده دارد. این موتور سه فاز بر روی اولین پایه با استفاده از یک نگهدارنده جایگذاری شده است



شکل ۱۰. نمای مختلف از تکیه‌گاه غلطکی

Fig. 10. Different views of the roller support



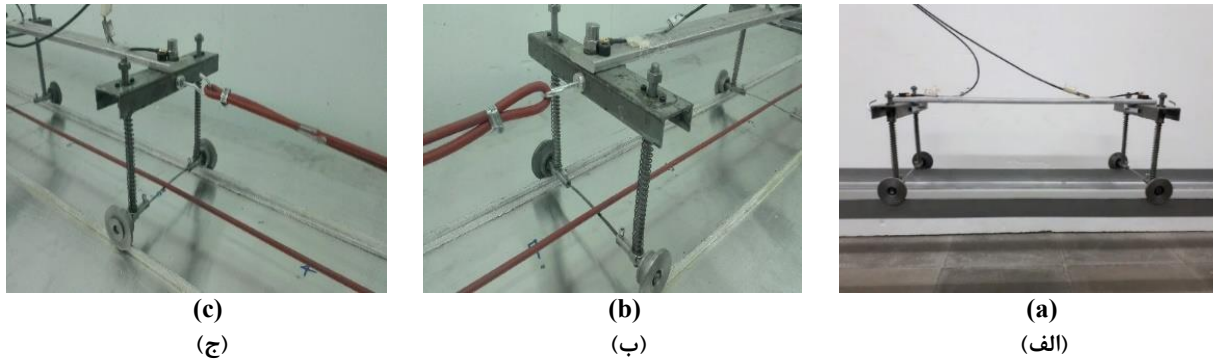
شکل ۱۱. اولین پایه به همراه موتور سه فاز و نگهدارنده موتور

Fig. 11. The first support and the 3-phase motor casing



شکل ۱۲. آخرین پایه به همراه نگهدارنده و تسمه سفت‌کن

Fig. 12. The last support and the cable tightener



شکل ۱۴. (الف) نمایی از وسیله نقلیه (ب) نمای محور عقب و (ج) نمای محور جلو وسیله نقلیه به همراه شتابسنج، سیم شتابسنج و تسمه لاستیکی
Fig. 14. (a) The vehicle picture (b) The view of the rear axle (c) The view of the front axle accompanied by the accelerometer, wire and rubber cable

آزمایش از قطعاتی تشکیل شده است که اهم آن عبارتند از: چهار فنر، چهار عدد میله نگهدارنده فنر، چهار عدد بوش ساچمه‌ای فلنج‌دار و چهار عدد چرخ فولادی، دو عدد نبشی و یک تیغه آلومینیومی تشکیل شده است. بوش ساچمه‌ای فلنج‌دار به منظور به حداقل رساندن اصطکاک در سیستم ارتعاشی وسیله نقلیه مورد استفاده قرار گرفته شده است. این چهار عدد بوش طوری در بالای چهار فنر تعبیه شده‌اند که چهار میله نگهدارنده فنر می‌توانند به طور کاملاً روان از درون آن‌ها حرکت داشته باشند.

نمایی از وسیله نقلیه در قسمت (الف) از شکل ۱۴ به تصویر کشیده شده است. دو سیم برای دو شتابسنج نیز کاملاً در این تصویر مشهود است. دو عدد سیم شتابسنج طوری بر روی تیغه آلومینیومی چسبانده شده است که در حرکت ارتعاشی وسیله نقلیه اختلالی ایجاد ننماید. نمای محور جلو و عقب وسیله نقلیه به همراه شتابسنج، سیم شتابسنج و تسمه لاستیکی نیز به ترتیب در قسمت‌های (ب) و (ج) از شکل ۱۴ نشان داده شده است.

به منظور فراهم آوردن توان مورد نیاز برای حرکت وسیله نقلیه و نیز کنترل دقیق‌تر حرکت آن، از موتور سه فاز با حداکثر دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه استفاده شده است. یک پولی در انتهای روتور، تسمه لاستیکی را به حرکت وامی‌دارد که قسمت (الف) در شکل ۱۵ تصویری از آن را نشان می‌دهد. همچنین یک مبدل^۱ جریان به منظور تغییر برق تک فاز شهری به برق سه فاز مورد نیاز موتور مورد استفاده قرار گرفته که نمایی از این مبدل در قسمت (ب) از شکل



شکل ۱۳. نمای کلی از مجموعه مورد آزمایش که دو بخش مربوط به کاهنده شتاب و افزایش شتاب به ترتیب در ابتدا و انتهای تصویر مشخص می‌باشند

Fig. 13. The setup overview picture; the acceleration and deceleration ramp in front and back of the picture, respectively

1 Inverter



(b)
(ب)



(a)
(الف)

شکل ۱۵. (الف) جانمایی موتور سه فاز بر روی اولین پایه (ب) مبدل جریان

Fig. 15. (a) The 3-phase motor setup over the first support (b) the inverter



(b)
(ب)



(a)
(الف)

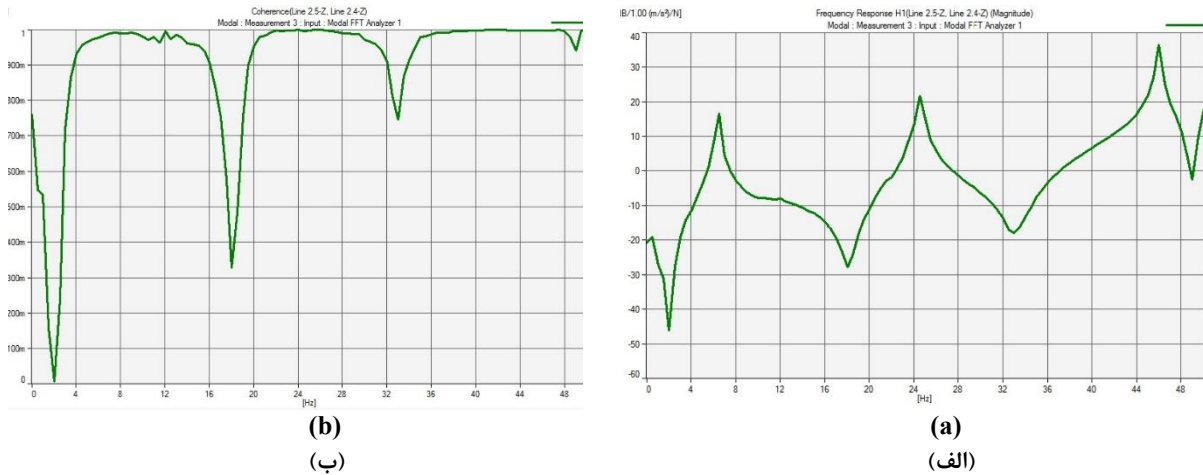
شکل ۱۶. (الف) چکش آزمایش مودال کلاسیک (ب) شتابسنج نصب شده در زیر پل

Fig. 16. (a) The hammer for the (b) the accelerometer sensor under the bridge

۴-۱- آزمایش مودال کلاسیک پل

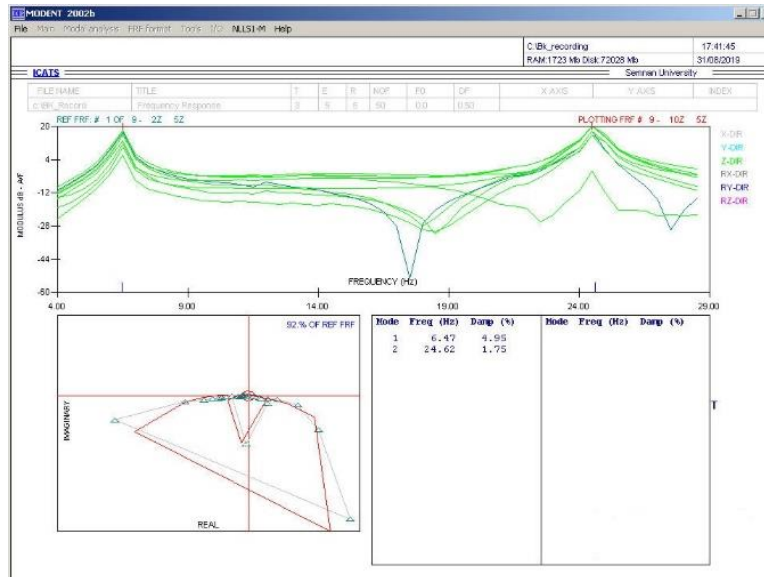
در این تحقیق از آزمایش چکش به عنوان آزمایش مودال کلاسیک به منظور شناسایی فرکانس و شکل مود پل استفاده می‌شود. شکل مود بدست آمده از این بخش به عنوان شکل مود دقیق در حالت آزمایشگاهی محسوب می‌گردد. جهت انجام آزمایش مودال چکش (شکل ۱۶ الف)، یک عدد شتاب سنج از نوع DJB/A/120V در خط وسط پل و در فاصله ۷۰ سانتی متری از تکیه گاه مفصلی قرار داده می‌شود (شکل ۱۶ ب). تحریک توسط چکش ارتعاشی BK/8202 انجام و داده تحریک با آمپلی فایر مدل 2647A تقویت شده است. تعداد ۹ نقطه روی پل طوری مشخص شده است که طول پل را به

۱۵ به نمایش درآمده است. مبدل جریان مذکور با نام زیما^۱ از مدل G100B008 با توان ۰/۷۵ وات می‌باشد. جریان نامی این مبدل مقدار ۲ آمپر و جریان ورودی آن مقدار ۳/۵ آمپر برآورد شده است. مدت زمان رسیدن دور موتور به مقدار مورد نیاز به گونه‌ای است که قبل از رسیدن وسیله نقلیه به پل فراهم می‌آید. بر روی مبدل، یک کلید به منظور تغییر دور موتور و تغییر سرعت حرکت وسیله نقلیه و نیز کلیدی دیگر به منظور ترمزگیری و توقف وسیله نقلیه قبل از برخورد به انتهای مسیر قرار داده شده است.



شکل ۱۷. (الف) نمودار تابع پاسخ فرکانسی و (ب) نمودار تابع ارتباط حاصل از آزمایش مودال چکش

Fig. 17. (a) Frequency response function (FRF) (b) the coherence from the hammer modal test



شکل ۱۸. تحلیل نتایج حاصل از آزمایش مودال کلاسیک در نرم افزار ICATS

Fig. 18. (a) Result analysis of experimental modal in ICATS

آزمایش مودال چکش در نرم افزار مودنت^۴ از مجموعه ایکتنز^۵ تحلیل شده است که فرکانس‌های طبیعی و شکل مود پل استخراج گردیده‌اند (شکل ۱۸ و جدول ۲).

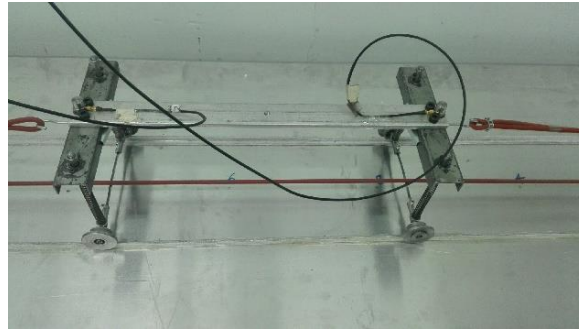
در این تحقیق، فرکانس طبیعی وسیله‌نقلیه از آزمایش ارتعاشات آزاد بدست آمده است. از آنجاکه در واقعیت میرایی وسایل نقلیه به گونه‌ای است که دوره ارتعاش وسیله‌نقلیه کمتر از یک سیکل می‌باشد

۱۰ قسمت مساوی تقسیم نماید. با انجام آزمایش مودال چکش، توابع پاسخ فرکانسی^۱ و نمودارهای ارتباط^۲ از نرم‌افزار پالس^۳ حاصل آمده که در شکل ۱۷ به تصویر کشیده شده است.

به منظور استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مود پل، داده‌های

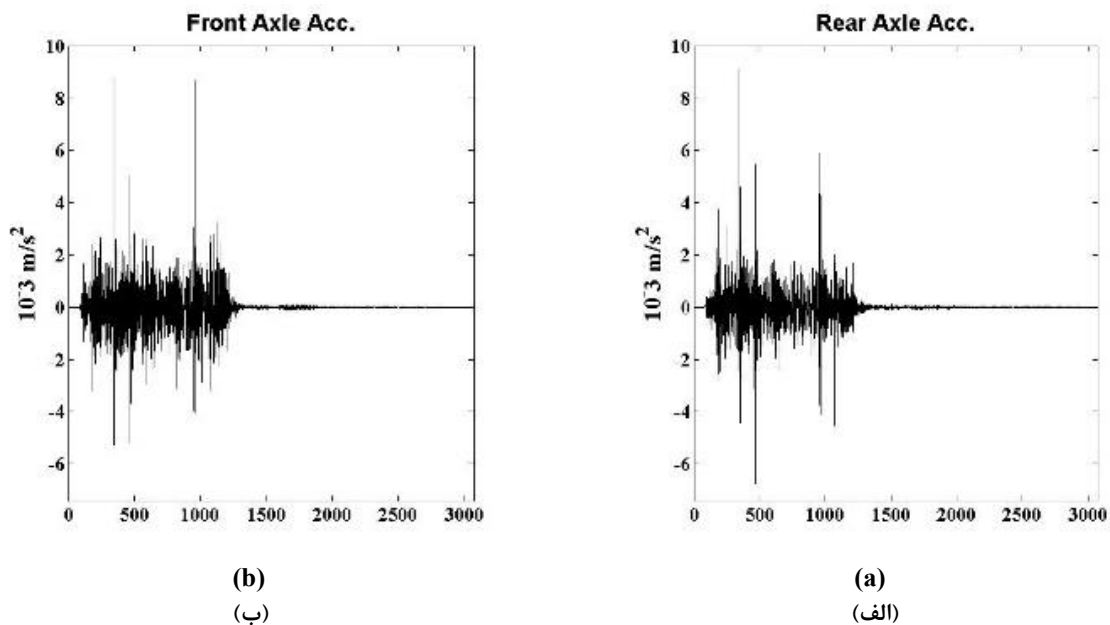
4 Modent
5 ICATS

1³ Frequency Response Functions (FRF)
2⁴ Coherence
3 Pulse



شکل ۱۹. وسیله نقلیه به همراه دو شتاب‌سنج در جلو و عقب آن

Fig. 19. (a) The vehicle with two accelerometers on the front and rear axles



(b)
(ب)

(a)
(الف)

شکل ۲۰. (الف) داده شتاب‌سنج عقب (ب) داده شتاب‌سنج جلو

Fig. 20. (a) The rear and (b) the front acceleration signals

نوع DJB/A/120V به قسمت‌های مساوی تقسیم می‌شود تا بتواند برای تخمین شکل مود پل مورد استفاده قرار گیرد. مقادیر هر یک از پارامترهای ارتعاشی وسیله‌نقلیه با توجه به کمیت‌های مذکور قابل محاسبه می‌باشند که این مقادیر در جدول ۵ مشاهده می‌گردد.

داده‌های شتاب ثبت‌شده از دو شتاب‌سنج در شکل ۲۰ ترسیم شده است. لحظه ورود محورهای جلو و عقب وسیله‌نقلیه به پل به صورت افزایش مقدار شتاب در هر یک از این شکل‌ها مشهود است. با توجه به اینکه مقدار زمان داده‌برداری بیشتر از مدت زمان مورد نیاز

لذا ارتعاشات آزاد برای استخراج فرکانس طبیعی از کارایی مناسبی برخوردار است. ارتعاشات آزاد وسیله‌نقلیه با اعمال جابجایی اولیه صورت می‌پذیرد و فرکانس طبیعی وسیله‌نقلیه با استفاده از نمودار حوزه فرکانسی، بدست می‌آید.

۴-۲- شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل

به منظور شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل، داده‌های ثبت شده از دو عدد شتاب‌سنجی که بر روی وسیله‌نقلیه قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۹). داده‌های شتاب ثبت‌شده از دو شتاب‌سنج

جدول ۵. پارامترهای ارتعاشی وسیله نقلیه مورد آزمایش

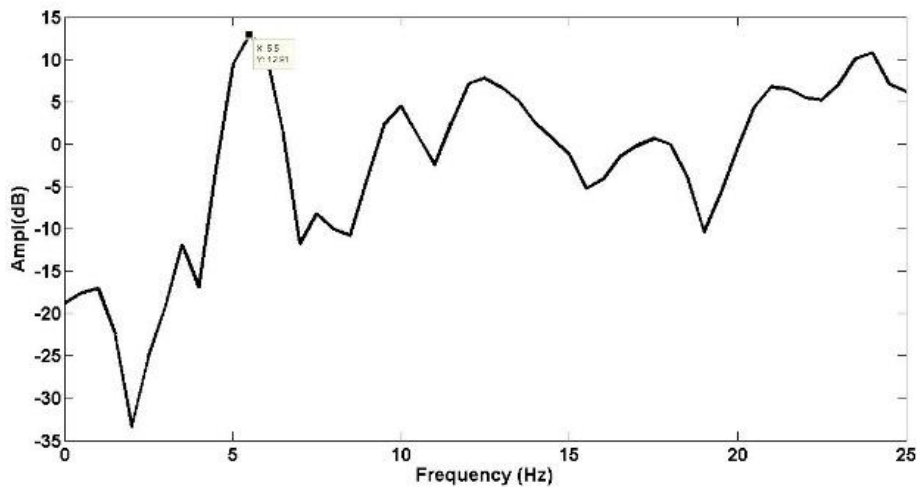
Table 5. The properties of the test vehicle

مقدار	مشخصات
۰/۵	فاصله دو محور وسیله نقلیه (m)
۱/۳۹	جرم وسیله نقلیه (kg)
۲۰۱۶	سفتی فنر وسیله نقلیه (N/m)
۰/۲۹	سرعت وسیله نقلیه (m/s)

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش مودال چکش

Table 4. The result of the experimental modal test

مقدار	مشخصات
۶/۴۷	فرکانس طبیعی مود اول (Hz)
۲۴/۶۲	فرکانس طبیعی مود دوم (Hz)



شکل ۲۱. تجزیه مقدار تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال پذیری برای مرحله اول

Fig. 21. The SVD of the power spectrum density transmissibility for the first stage

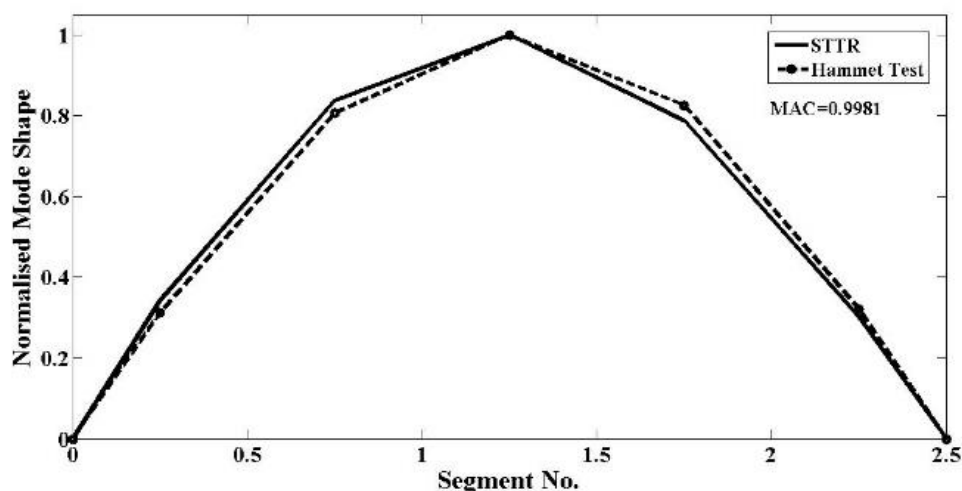
مقادیر تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال پذیری از مرحله اول در شکل ۲۱ به تصویر کشیده شده که فرکانس ۵/۵ هرتز به طور واضح قابل رویت است. اختلاف فرکانس حاصل از روش غیرمستقیم با روش مستقیم (تست مودال کلاسیک چکش) به علت حضور وسیله نقلیه روی پل و نیز حرکت وسیله نقلیه می باشد. حضور وسیله نقلیه روی پل باعث افزایش جرم شده و به تبع آن فرکانس طبیعی را کاهش می دهد. حرکت شتاب سنج نصب شده بر روی وسیله نقلیه نیز موجب ایجاد نوعی پدیده مشابه داپلر^۱ می گردد که باعث ثبت مقادیر کوچکتر یا بزرگتر از فرکانس طبیعی می شود [۱۹].

بردارهای تکین متناظر با هر کدام از مقادیر تکین به عنوان شکل مود موضعی نقاط مختلف محسوب می گردد که پس از اعمال

برای طی مسافت پل می باشد، باید لحظه ورود و خروج وسیله نقلیه به پل تعیین گردد. این امر با ثبت زمان ورود و خروج وسیله نقلیه و انجام مقادری محاسبات ساده ریاضی امکان پذیر خواهد بود. در روش حاضر [۱۳]، مدت زمان مورد نیاز برای استخراج پارامترهای ارتعاشی پل به صورت فاصله زمانی از لحظه ورود محور عقب به پل تا لحظه خروج محور جلو از پل در نظر گرفته شده است. لذا با انتخاب طول داده های شتاب متناسب با این مدت زمان می توان ادامه مراحل شناسایی پارامترها را انجام داد.

پس از به دست آوردن بازه های مورد نیاز از داده های شتاب، هر یک با نسبت ۵ تقسیم می شوند. سپس فرکانس طبیعی با تجزیه مقادیر تکین ماتریس چگالی طیف توان انتقال پذیری به صورت قله غالب در نمودار مربوطه قابل رویت خواهد بود. برای نمونه، نمودار تجزیه

1 Doppler Effect



شکل ۲۲. مقایسه اولین شکل مود پل از روش غیرمستقیم با روش کلاسیک

Fig. 22. The comparison between the first bridge mode shape from indirect and classical method

میزان‌سازی مجدد به منظور استخراج شکل مدهای کلی استفاده شده است. در شبیه‌سازی عددی، وسیله‌نقلیه به صورت چهار درجه آزادی و پل به صورت اوپلر-برنولی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های عددی حاکی از آن است که این روش قادر است، شکل مود پل را با دقت قابل قبولی شناسایی کند.

از آنجا که کارامدی هر روش نیازمند بررسی آن روش در شرایط واقعی است، پیاده‌سازی آزمایشگاهی این روش غیرمستقیم یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های تحقیق حاضر به حساب می‌آید. برای این منظور یک مجموعه به عنوان سازه آزمایشگاهی استفاده شده است. یک صفحه آلومینیومی به عنوان پل طوری طراحی و ساخته شده است که از یک سمت منتهی به تکیه‌گاه مفصلی بوده و از سمت دیگر بر روی تکیه‌گاه غلطکی قرار گرفته است.

یک وسیله‌نقلیه که از دو محور و چهار فنر تشکیل شده است با سرعت ثابت از روی صفحه آلومینیومی عبور کرده است. ثبت داده شتاب بر عهده دو شتاب‌سنج یکی بر روی محور جلو و دیگری بر روی محور عقب گذاشته شده است. با اعمال روش غیرمستقیم پیشنهادی که بر مبنای نسبت انتقال‌پذیری است، استخراج شکل مدهای پل از داده شتاب انجام پذیرفته است. مقایسه شکل مود حاصل از روش غیرمستقیم با شکل مود حاصل از آزمون مودال چکش حاکی از دقت قابل قبول روش غیرمستقیم است.

مقیاس‌گذاری می‌توان به شکل مود کلی پل دست یافت. اولین شکل مود بدست‌آمده از روش غیرمستقیم (خطوط پیوسته) و روش مستقیم آزمایش مودال چکش (نقطه خط چین) در شکل ۲۲ به نمایش درآمده است. مقدار 0.9981 برای معیار مک^۱ میان این دو شکل مود دلالت بر دقت قابل قبول روش غیرمستقیم پیشنهادی در شناسایی شکل مود پل دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شناسایی غیرمستقیم شکل مود پل با استفاده از اندازه‌گیری انتقال‌پذیری به صورت تئوری و آزمایشگاهی 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 وسیله‌نقلیه مرجع نبوده و از آنجا که داده‌برداری توسط شتاب‌سنج‌های تعبیه‌شده بر محور وسیله‌نقلیه انجام می‌گیرد، وسیله‌نقلیه بدون توقف از روی پل عبور می‌کند. این مورد می‌تواند در شرایط میدانی باعث سهولت، صرفه‌جویی در هزینه و زمان گردد و نیاز به حضور افراد متخصص در محل را مرتفع نماید.

به دلیل متحرک‌بودن شتاب‌سنج، شکل مدهای حاصل از روش زمان کوتاه، به عنوان شکل مود موضعی محسوب می‌گردند لذا از

۶- فهرست علائم

		علائم انگلیسی	
مشتق اول بردار جابجایی و چرخش گرهی پل، m/s	$\{\dot{Y}_b\}$	C_s	میرایی سیستم تعلیق وسیله نقلیه، N.m/s
مشتق دوم بردار جابجایی و چرخش گرهی پل، m/s ²	$\{\ddot{Y}_b\}$	$[C_v]$	ماتریس میرایی وسیله نقلیه، N.s/m
بردار به هم وابسته جابجایی پل و وسیله نقلیه، m	$\{Y_T\}$	$[C_b]$	ماتریس کلی میرایی پل، N.s/m
مشتق اول بردار به هم وابسته جابجایی پل و وسیله نقلیه، m/s	$\{\dot{Y}_T\}$	$[C_T]$	ماتریس به هم وابسته میرایی پل و وسیله نقلیه، N.s/m
مشتق دوم بردار به هم وابسته جابجایی پل و وسیله نقلیه، m/s ²	$\{\ddot{Y}_T\}$	E	مدول الاستیک پل، N/m ²
بردار جابجایی وسایل نقلیه، m	$\{Y_v\}$	$\{f_{int}\}$	بردار نیروی برهم کنش وسایل نقلیه و پل، N
بردار سرعت وسایل نقلیه، m/s	$\{\dot{Y}_v\}$	$\{f_v\}$	بردار نیروی برهم کنش وسایل نقلیه، N
بردار شتاب وسایل نقلیه، m/s ²	$\{\ddot{Y}_v\}$	i	عدد موهومی $\sqrt{-1}$
شتاب اولین محور وقتی که از قسمت (i + 1) عبور می کند، m/s ²	$\ddot{y}_{i+1,1}$	I	ممان اینرسی سطح مقطع پل، m ⁴
شتاب دومین محور وقتی که از قسمت (i) عبور می کند، m/s ²	$\ddot{y}_{i,2}$	$[K_b]$	ماتریس کلی سفتی پل، N/m
جابجایی قائم بدنه وسیله نقلیه، m	y_s	K_s	سفتی سیستم تعلیق وسیله نقلیه، N/m
جابجایی قائم محور وسیله نقلیه، m	y_u	K_T	سفتی چرخ وسیله نقلیه، N/m
علائم یونانی		$[K_T]$	ماتریس به هم وابسته سفتی پل و وسیله نقلیه، N/m
ضریب میرایی پل	ζ	$[K_v]$	ماتریس سفتی وسیله نقلیه، N/m
تغییر زاویه دورانی بدنه وسیله نقلیه، rad	θ_s	L_v	فاصله بین دو محور وسیله نقلیه، m
ماتریس قطری مقادیر تکین	$[\Lambda]$	L	طول پل، m
شکل مود کلی اولین قسمت از پل	φ_1	m_s	جرم بدنه وسیله نقلیه، kg
شکل مود کلی دومین قسمت از پل	φ_2	m_u	جرم محور وسیله نقلیه، kg
شکل مود موضعی قسمت (i + 1) حاصل از محور اول	$\psi_{i+1,1}$	$[M_b]$	ماتریس کلی جرمی پل، N/m
شکل مود موضعی قسمت (i) حاصل از محور دوم	$\psi_{i,2}$	$[M_T]$	ماتریس به هم وابسته جرمی پل و وسیله نقلیه، kg
درایه kام از شکل مود lam	ψ_{kl}	$[M_v]$	ماتریس جرمی وسیله نقلیه، kg
زیر نویس		\bar{m}	جرم واحد طول پل، kg/m
اولین محور	1	$[N_b]$	ماتریس (تابع شکل) بسط نیروی اعمالی بر گره های پل
دومین محور	2	$S_{x_o x_k}$	چگالی طیف توان خروجی های x_k و x_o ، m ² /s ³
پل	b	$T_{x_o x_j}^k$	چگالی طیف توان انتقال پذیری نسبت به مرجع k
بدنه وسیله نقلیه	s	$[U]$	بردار تکین چپ
برهم کنش وسیله نقلیه با پل	T	$[V]$	بردار تکین راست
محور وسیله نقلیه	u	v	سرعت افقی وسیله نقلیه، m/s
وسيله نقلیه	v	x	محور افقی
بالا نویس		y	محور افقی
مزدوج مختلط	*	y_b	جابجایی قائم پل در زیر چرخ وسیله نقلیه، m
مرجع محاسبه انتقال پذیری	k, z_i	$\{Y_b\}$	بردار جابجایی و چرخش گرهی پل، m

- [11] Y. Yang, J.P. Yang, State-of-the-art review on modal identification and damage detection of bridges by moving test vehicles, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 18(02) (2018) 1850025.
- [12] X. Kong, C. Cai, B. Kong, Damage detection based on transmissibility of a vehicle and bridge coupled system, *Journal of Engineering Mechanics*, 141(1) (2014) 04014102.
- [13] S.M. Marashi, M.H. Pashaei, M.M. Khatibi, Estimating the Mode Shapes of a Bridge Using Short Time Transmissibility Measurement from a Passing Vehicle, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 5(4) (2019) 735-748.
- [14] J. Keenahan, E.J. O'Brien, P.J. McGetrick, A. Gonzalez, The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping, *Structural Health Monitoring*, (2013) 1475921713513974.
- [15] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, R.L. Taylor, R.L. Taylor, *The finite element method: solid mechanics*, Butterworth-heinemann, 2000.
- [16] J.W. Tedesco, W.G. McDougal, C.A. Ross, *Structural dynamics: theory and applications*, Addison Wesley Longman, 1999.
- [17] I.G. Araújo, J.E. Laier, Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 46(1) (2014) 129-145.
- [18] J. Keenahan, P. McGetrick, E.J. O'Brien, A. Gonzalez, Using instrumented vehicles to detect damage in bridges, in: *15th International Conference on Experimental Mechanics*, Porto, Portugal, 22-27 July 2012, Paper No. 2934, Faculty of Engineering, University of Porto, 2012.
- [19] Y. Yang, K. Chang, Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle: Parametric study, *Engineering Structures*, 31(10) (2009) 2448-2459.
- [1] A. Pandey, M. Biswas, M. Samman, Damage detection from changes in curvature mode shapes, *Journal of sound and vibration*, 145(2) (1991) 321-332.
- [2] X. Zhu, S. Law, Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history, *International Journal of Solids and Structures*, 43(7) (2006) 2299-2317.
- [3] V. Arora, S. Singh, T. Kundra, Damped model updating using complex updating parameters, *Journal of Sound and Vibration*, 320(1) (2009) 438-451.
- [4] Y. Zhang, L. Wang, Z. Xiang, Damage detection by mode shape squares extracted from a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, 331(2) (2012) 291-307.
- [5] Y. Yang, Y. Li, K. Chang, Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: a theoretical study, *Smart Structures and Systems*, 13(5) (2014) 797-819.
- [6] Y. Oshima, K. Yamamoto, K. Sugiura, Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles, *Smart Structures and Systems*, 13(5) (2014) 731-753.
- [7] A. Malekjafarian, E. O'Brien, Identification of bridge mode shapes using Short Time Frequency Domain Decomposition of the responses measured in a passing vehicle, *Engineering Structures*, 81 (2014) 386-397.
- [8] W.-Y. He, J. He, W.-X. Ren, Damage localization of beam structures using mode shape extracted from moving vehicle response, *Measurement*, 121 (2018) 276-285.
- [9] W.Y. He, W.X. Ren, X.H. Zuo, Mass-normalized mode shape identification method for bridge structures using parking vehicle-induced frequency change, *Structural Control and Health Monitoring*, 25(6) (2018) e2174.
- [10] A. Malekjafarian, E.J. O'Brien, On the use of a passing vehicle for the estimation of bridge mode shapes, *Journal of Sound and Vibration*, 397 (2017) 77-91.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Marashia, M. H. Pashaei a , M. M. Khatibib, M. Abdollahi, Experimental verification of indirect bridge mode shape identification using transmissibility of a passing vehicle, Amirka-bir J. Mech Eng., 53(6) (2021) 3529-3548.

DOI: [10.22060/mej.2021.18630.6866](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18630.6866)



