

تشخیص خرابی در پل‌ها به روش غیرمستقیم بر مبنای شتاب نقطه تماسی

وسیله متحرک و پل

مقاله علمی - پژوهشی

محسن محمدکریمی حسین آبادی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رضا مرشد*، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: morshed@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۲۷۰-۲۵۱

چکیده

پل‌ها از جمله زیرساخت‌های حیاتی یک کشور بوده که نگهداری و تشخیص به موقع خرابی‌های ایجاد شده در این سازه‌ها نقش بسزایی در افزایش ایمنی و عمر بهره‌برداری آنها دارد. در این میان روش‌های غیرمستقیم پایش سلامت پل که در آنها سنسور بر روی وسیله متحرک در حال حرکت بر روی پل نصب شده و دیگر نیازی به نصب سنسور بر روی پل نیست، می‌توانند وضعیت سلامت پل را سریعتر و اقتصادی‌تر بررسی کنند. با وجود این مزایا، در روش غیر مستقیم شتاب ثبت شده توسط اجزای وسیله متحرک حاوی فرکانس‌های وسیله متحرک و پل بوده که این آغستگی می‌تواند مانع انجام صحیح عملیات تشخیص خرابی شود. از آنجایی که اثر پارامترهای دینامیکی وسیله متحرک در شتاب نقطه تماسی بین وسیله متحرک و پل خیلی کمتر از شتاب اجزای وسیله متحرک است، می‌توان وضعیت سلامت پل را به کمک شتاب نقطه تماسی راحت‌تر از خود شتاب ثبت شده توسط اجزای وسیله متحرک ارزیابی کرد. در این مقاله از تبدیل فوریه شتاب قائم نقطه تماسی برای ارزیابی وضعیت پل استفاده شده است. ابتدا در وضعیت سلامت پل تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی برای حرکت وسیله نقلیه با سرعت‌های مختلف که با استفاده از فرآیند بازگشتی محاسبه شده، بدست می‌آید. سپس تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی برای حرکت وسیله متحرک با سرعت‌های زمان بهره‌برداری پیش‌بینی شده و با مقایسه این مقادیر و نتایج حاصل از تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی در زمان سلامت پل، کارایی روش پیشنهادی در تشخیص وجود خرابی و شدت خرابی در پل بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که امکان تشخیص وجود خرابی و شدت خرابی با استفاده از تبدیل فوریه پاسخ نقطه تماسی بین پل و وسیله متحرک در سرعت‌های متفاوت وسیله متحرک وجود دارد. همچنین نشان داده شد که روش پیشنهادی در شرایط وجود ناهمواری در روسازی پل و وجود نویز در شتاب، عملکرد خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: پایش سلامت پل، روش غیر مستقیم، خرابی روسازی، اندرکنش پل و وسیله متحرک

۱- مقدمه

به شمار می‌رود که در روش‌های مختلف ارائه شده در تحقیقات متعددی استفاده شده است. روش‌های پایش سلامت پل‌ها را می‌توان به دو گروه کلی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم نمود. در روش مستقیم ابتدا سنسورهایی بر روی قسمت‌های مختلف بدنه پل نصب شده و سپس پارامترهای مودال سازه که شامل فرکانس‌ها، شکل مودها و میرایی است با استفاده از اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی پل بدست می‌آید. با توجه به مشکلات اجرایی

پل‌ها بخش مهمی از سیستم حمل و نقل یک کشور نظیر بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی هستند. عواملی همچون افزایش عمر سازه، اضافه بار وسیله نقلیه عبوری، شرایط محیطی و ضعف مصالح و خرابی‌های ایجاد شده در بخش‌های مختلف پل منجر به تغییر مشخصات آن می‌شود. در دهه‌های گذشته پایش سلامت پل^۱ به‌طور گسترده توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته و در این میان، فرکانس ارتعاشی پل از جمله پارامترهای مهمی

تماسی^۵ بین وسیله متحرک و پل برای استخراج فرکانس ارتعاشی و شکل مودهای اصلی پل استفاده کردند و پاسخی به صورت فرم بسته^۶ برای آن ارائه دادند. یانگ و همکاران (Yang et al. 2018) مدل یک چهارمی از وسیله متحرک با یک درجه آزادی بدنه و بدون میرایی استفاده کرده و در ادامه ژو و همکاران (Xu et al. 2021) مدل یک چهارمی از وسیله متحرک با یک درجه آزادی بدنه و با در نظر گرفتن میرایی برای وسیله متحرک و یاگ و همکاران (Corbally and Malekjafarian. 2021) مدل یک چهارمی از وسیله متحرک با دو درجه آزادی یکی برای بدنه وسیله متحرک و دیگری برای سیستم چرخ و با در نظر گرفتن میرایی بین سیستم چرخ و بدنه اصلی وسیله متحرک استفاده کرده و روابط محاسبه شتاب نقطه تماسی با استفاده از شتاب ثبت شده از درجات آزادی وسیله متحرک را ارائه داده‌اند. در مرجع (Yang et al. 2020) به صورت میدانی از پاسخ نقطه تماسی وسیله متحرک در دو حالت وسیله متحرک در حال حرکت و وسیله متحرک ثابت بر روی پل برای استخراج فرکانس پل استفاده شده است. ژو و همکاران (Xu et al. 2021) و یانگ و همکاران (Yang et al. 2020) با شتاب نقطه تماسی به صورت میدانی فرکانس‌های پل را استخراج نموده‌اند. هاشلمون و همکاران (Hashlamon et al. 2021) از پاسخ نقطه تماسی وسیله متحرک در حالت ایستاده بر روی پل برای استخراج فرکانس ارتعاشی پل استفاده کرده است. مرجع (Bin Zhang et al. 2018) با استفاده از تبدیل هیلبرت و پاسخ نقطه تماسی وسیله متحرک وجود خرابی و محل آن را در پل تشخیص دادند. با توجه به اینکه در شتاب نقطه تماسی اثر فرکانس ارتعاشی اجزاء وسیله متحرک کمتر است در این مقاله با استفاده از مدل یک چهارم از وسیله متحرک با دو درجه آزادی بدنه اصلی و چرخ وسیله متحرک و با وجود میرایی بین بدنه اصلی و چرخ وسیله متحرک استفاده شده و روابط نحوه استخراج شتاب نقطه تماسی با استفاده از شتاب بدنه اصلی و چرخ وسیله متحرک ارائه شده است. با مقایسه طیف پاسخ شتاب نقطه تماسی در حالت پل سالم و پل خراب در سرعت‌های مختلف عبور وسیله متحرک بر روی پل وجود خرابی و شدت خرابی در پل تشخیص داده شده است. همچنین تشخیص وجود خرابی بکمک طیف شتاب نقطه تماسی با وجود خرابی در روسازی پل و در نظر گرفتن مقادیر مختلف نویز در شتاب ثبت شده از وسیله متحرک بررسی شده است.

نصب سنسور بر روی پل در سال‌های گذشته روش‌هایی موسوم به پایش غیرمستقیم پل توسعه یافته‌اند که در آنها سنسور بر روی وسیله متحرک عبوری از پل نصب شده و با حرکت این وسیله در طول پل، اقدام به اندازه‌گیری مشخصات مودال آن می‌نماید. یانگ و همکاران برای اولین بار ایده استفاده از روش پایش غیرمستقیم پل^۷ که تحت عناوینی نظیر روش راندن^۸ یا روش ماشین اسکن^۹ هم مطرح است، ارائه نمودند (Yang, Lin and Yau. 2004). در این روش سنسورها تنها بر روی وسیله متحرک عبوری از پل نصب می‌شوند که منجر به مزایایی نظیر اقتصادی‌تر شدن، قابلیت جابجایی بیشتر و سرعت بالای عملیات پایش پل در مقایسه با روش‌های سنتی که در آنها سنسورها بر روی پل نصب می‌شوند، شده است. این قابلیت وجود دارد که سنسورها را در وسیله متحرک خاص طراحی شده برای این روش قرارداد و از پاسخ‌های بدست آمده از آن در بررسی رفتار پل استفاده کرد (Yang, et al. 2020; Keenahan et al. 2014). تلاش‌های تئوری و تجربی متعددی برای تخمین فرکانس پل [Cantero, et al. 2019; Lin and Yang. 2020; Zhang, Zhao 2005; Yang et al. 2020]، شکل مودی (Zhang, Zhao 2005; Yang et al. 2020) و میرایی (and Lie 2019; Yang, Li and Chang. 2014) با استفاده از روش غیر مستقیم صورت گرفته است. یکی از چالش‌هایی که استخراج فرکانس پل از پاسخ وسیله متحرک با آن روبرو است تداخل فرکانس‌های ارتعاشی خود وسیله متحرک با فرکانس‌های ارتعاشی پل در طیف شتاب بدست آمده از وسیله متحرک است (Corbally and Malekjafarian. 2021; Yang et al. 2013). وسیله متحرک مثل یک فیلتر پایین گذر عمل کرده و فرکانس‌های بیشتر از وسیله متحرک را در پاسخ وسیله متحرک حذف می‌کند و باعث می‌شود بدست آوردن فرکانس‌های پل و شکل مودهای متناظر آن که بیشتر از فرکانس وسیله متحرک باشد با سختی مواجه شود (Nayek, Narasimhan. 2020). فرایند تعیین پارامترهای مودال پل به روش غیرمستقیم به ویژه در زمانی که خرابی روسازی در پل وجود داشته باشد تشدید می‌شود. این امر سبب شده تا تلاش‌های متعددی برای حذف اثر خرابی‌های روسازی در پارامترهای مودال بدست آمده از پاسخ‌های ثبت شده به روش غیرمستقیم و تدقیق بیشتر روش شناسایی پل انجام شود (Yang, Li and Chang. 2012; Keenahan et al. 2014). یانگ و همکاران (Yang et al. 2018) از پاسخ نقطه

۲- پیشینه تحقیق

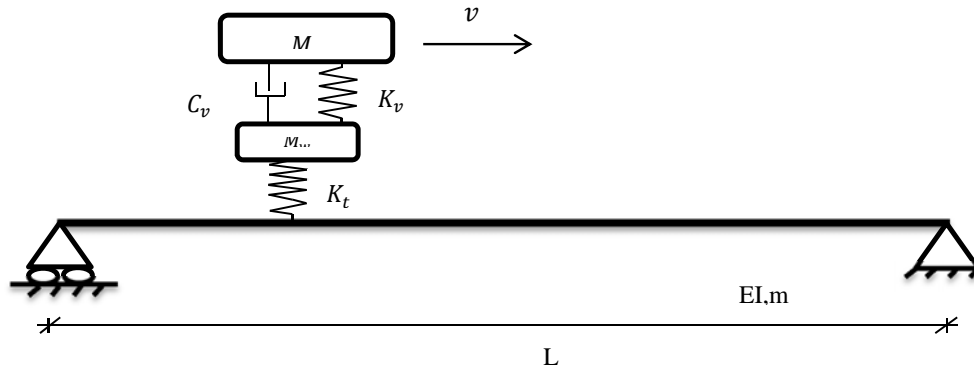
و میرایی C_v سوار بر درجه آزادی دوم که بیانگر چرخ وسیله متحرک به جرم M_w و با سختی k_t به عنوان سختی تاپر با سطح پل در تماس بوده، نشان داده شده است. پل به صورت دو سر ساده به طول L با مقطع یکنواخت به جرم واحد طول m و سختی خمشی EI به صورت تیر برنولی-اویلر مدلسازی شده و معادله حاکم بر پل به صورت رابطه (۱) است.

$$[M_b]\{\ddot{y}_b\} + [C_b]\{\dot{y}_b\} + [K_b]\{y_b\} = \{F_b\} \quad (1)$$

نیروهای وارد بر درجات آزادی پل است. معادله حاکم بر وسیله متحرک به صورت رابطه (۲) است.

$$[M_v]\{\ddot{y}_v\} + [C_v]\{\dot{y}_v\} + [K_v]\{y_v\} = \{F_v\} \quad (2)$$

در این رابطه $[M_v]$ ، $[C_v]$ و $[K_v]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی وسیله متحرک و بردار $\{y_v\}$ بردار جابجایی وسیله متحرک و $\{F_v\}$ بردار نیروهای وارد بر وسیله متحرک است. برای حل اندرکنش بین وسیله متحرک و پل روش تکرار (Yang et al. 2004) مورد استفاده قرار گرفت.

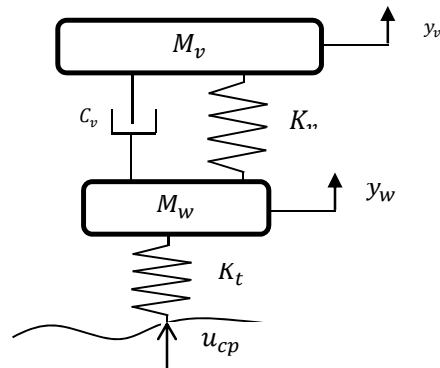


شکل ۱. مدل پل و وسیله متحرک (Yang, Lin and Yau 2004)

۲-۲- محاسبه شتاب قائم نقطه تماسی

y_w و جابجایی قائم سیستم چرخ با y_w و جابجایی قائم نقطه تماسی با u_{cp} نشان داده شده است.

شتاب نقطه تماسی را نمی‌توان بطور مستقیم اندازه گرفت و باید به صورت تحلیلی و از معادله حاکم بر وسیله متحرک محاسبه نمود. در شکل ۲ جابجایی قائم بدنه وسیله متحرک با



شکل ۲. نمایش از مدل وسیله متحرک و نقطه تماسی بین وسیله متحرک و پل

معادله حاکم بر وسیله متحرک به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید (Corbally and Malekjafarian, 2021).

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & M_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_v \\ \ddot{y}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_v \\ \dot{y}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v + k_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_v \\ y_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ k_t u_{cp} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در این رابطه علامت " " نشانه مشتق نسبت به زمان t است.

از ردیف دوم معادله (۳) رابطه نقطه تماسی را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$M_w \ddot{y}_w + c_v (\dot{y}_w - \dot{y}_v) + k_v (y_w - y_v) + k_t y_w = k_t u_{cp} \quad (4)$$

از رابطه ۴ جابجایی نقطه تماسی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$u_{cp} = \frac{M_w}{k_t} \ddot{y}_w + \frac{c_v}{k_t} (\dot{y}_w - \dot{y}_v) + \frac{k_v}{k_t} (y_w - y_v) + \frac{k_t}{k_t} y_w \quad (5)$$

شتاب نقطه تماسی به صورت رابطه (۶) به دست می‌آید (Corbally and Malekjafarian, 2021; Yang et al. 2018; Xu et al. 2021).

همان‌طور که توضیح داده شد در آزمایش، امکان ثبت شتاب نقطه تماسی وجود ندارد و باید به صورت فرآیند بازگشتی^۷ به دست بیاید. با دو بار مشتق‌گیری نسبت به زمان از معادله (۱)

$$\ddot{u}_{cp} = \frac{M_w}{k_t} \frac{d^2 \ddot{y}_w}{dt^2} + \frac{c_v}{k_t} \left(\frac{d \dot{y}_w}{dt} - \frac{d \dot{y}_v}{dt} \right) + \frac{k_v}{k_t} (\ddot{y}_w - \ddot{y}_v) + \ddot{y}_w \quad (6)$$

رابطه‌های ۷ و ۸ فاصله زمانی ثبت داده است و $\dot{\mathbf{i}}$ مشخص کننده آمین گام برداشت داده است. با جایگذاری این دو رابطه در رابطه ۶ شتاب نقطه تماسی با ثبت شتاب قائم بدنه اصلی و چرخ وسیله متحرک قابل محاسبه است.

که در این رابطه مشتق $\frac{d^n \ddot{y}}{dt^n}$ نام \ddot{y} نسبت به زمان است. با استفاده از روش تفاوت محدود^۸ می‌توان در رابطه (۶) به جای عبارت $\frac{d^2 \ddot{y}}{dt^2}$ و $\frac{d \dot{y}}{dt}$ عبارتهای (۷) و (۸) را جایگذاری نمود. که در

$$\frac{d^2 \ddot{y}_v}{dt^2} = \frac{(\ddot{y}_v|_{i-1} - 2\ddot{y}_v|_i + \ddot{y}_v|_{i+1})}{(\Delta t)^2} \quad (7)$$

$$\frac{d \dot{y}_v}{dt} = \frac{(\dot{y}_v|_{i+1} - \dot{y}_v|_{i-1})}{2\Delta t} \quad (8)$$

۳-۲- مدل‌سازی خرابی در پل

(2018). که $(EI)_i^0$ سختی خمشی آمین المان در وضعیت سالم بودن از بین n المان است و α_i مقدار ضریب کاهش سختی است که $0 \leq \alpha_i \leq 1$ می‌تواند اختیار گردد.

در این تحقیق فرض شد که خرابی‌ها خطی بوده و همچنین سازه الاستیک خطی بعد از خرابی جزئی به صورت الاستیک خطی باقی می‌ماند. این حالت خرابی به صورت کاهش سختی در المان آسیب دیده در نظر گرفته شد. براین اساس سختی المان آسیب دیده \hat{I} به صورت زیر تعریف می‌شود (Zhu et al. 2018).

$$(EI)_i = (1 - \alpha_i)(EI)_i^0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

۲-۴- مدل‌سازی ناهمواری روسازی^۹

در این رابطه \mathbf{i} ، \mathbf{n}_i ، \mathbf{i} امین فرکانس در محدوده ۱ تا ۱۰۰ دور بر متر که به صورت $\Delta n=0/04$ دور بر متر افزایش می‌یابد. θ_i مقدار زاویه فاز تصادفی است و d_i مقدار دامنه ناهمواری است که به صورت ۱۱ تعریف می‌شود.

$$r(x) = \sum_i d_i \cos(n_i x_c + \theta_i) \quad (10)$$

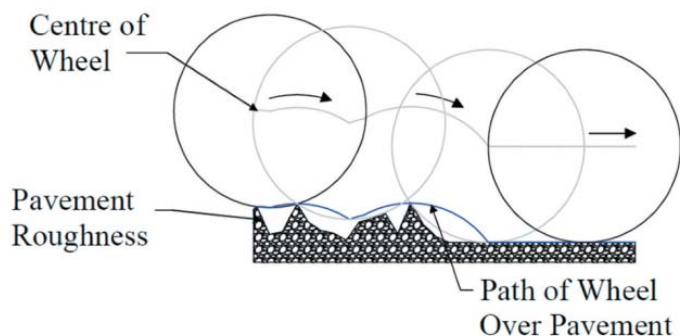
$$d_i = \sqrt{2G_d(n_i)\Delta n} \quad (11)$$

G_d مقدار تابع چگالی طیفی جابجایی است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

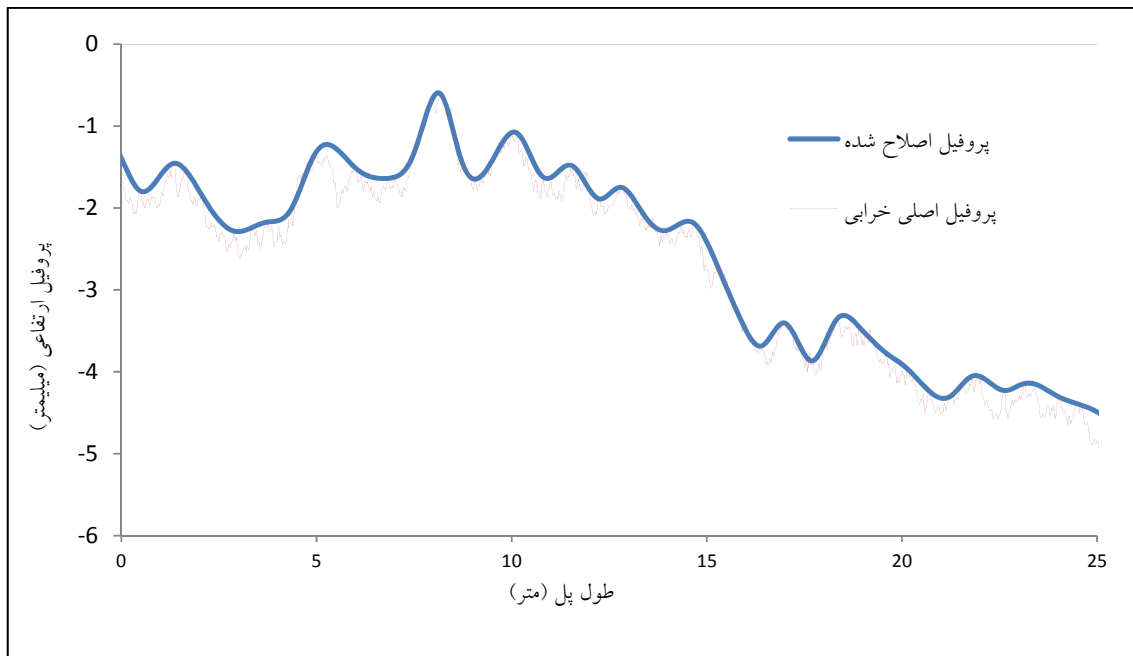
$$G_d(n_i) = G_d(n_0) \left(\frac{n_i}{n_0}\right)^{-\omega} \quad (12)$$

براین اساس از مدل دیسک صلب مطابق شکل ۳ برای اصلاح ناهمواری روسازی پیشنهاد شده توسط استاندارد ISO 8608 استفاده شده و پروفیل روسازی قبل و بعد از اعمال مدل دیسک در شکل ۴ نشان داده شده است. در این فرضیات و مدل‌سازی قطر لاستیک برابر با ۸۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (Hashlamon et al. 2021).

که $\omega=2$ و $n_0=0/1$ دور بر متر است و $G_d(n_0)$ بر اساس طبقه بندی استاندارد ISO 8608 تعیین می‌شود. $G_d(n_0)$ طبق طبقه بندی استاندارد اشاره شده خرابی از نوع A و برابر با $10^{-6} \times 0/1$ است. از طرفی در واقعیت لاستیک وسیله متحرک به صورت نقطه‌ای نیست و برای حرکت بر روی ناهمواری روسازی بعثت داشتن ابعاد بدین صورت نیست که با تمام نقاط در تماس باشد.



شکل ۳. نحوه اعمال اثر دیسک سلب برای عبور چرخ بر روی خرابی روسازی (Corbally and Malekjafarian. 2021)



شکل ۴: خرابی روسازی قبل و بعد از اعمال اثر دیسک صلب

۲-۵- تشخیص خرابی به کمک تبدیل فوریه پاسخ نقطه تماسی

برای مشخص کردن تغییر در پاسخ وسیله متحرک برای تشخیص خرابی از معیار خطای جذر میانگین مربعات^{۱۳} (RMSE) استفاده شده است (رابطه ۱۳).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$

(۱۳)

تبدیل فوریه پاسخ نقطه تماسی حاوی فرکانس‌های ارتعاشی پل است از طرفی وجود خرابی منجر به تغییر فرکانس ارتعاشی پل می‌شود بنابراین با مقایسه تبدیل فوریه پاسخ نقطه تماسی در حالت سالم بودن پل و حالت وجود خرابی امکان تشخیص وجود خرابی در پل وجود دارد.

محدوده فرکانس اول پل برای تشخیص خرابی استفاده شده است.

۲-۶- تشخیص خرابی به کمک تبدیل فوریه شتاب نقطه

تماسی در سرعت‌های مختلف

همان‌طور که توضیح داده شد با مقایسه تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی وسیله متحرک در زمان سالم بودن و خراب بودن پل با استفاده از معیار خطای جذر میانگین مربعات (رابطه ۱۳) وجود خرابی در پل با فرض یکسان بودن سرعت عبور وسیله متحرک بر روی پل تشخیص داده می‌شود. ولی سرعت عبور وسیله متحرک در هنگام بهره‌برداری (با احتمال وجود خرابی) مسلماً با سرعت عبور وسیله متحرک در زمان سالم بودن پل

روش پیشنهادی بدین صورت است که ابتدا شتاب نقطه تماسی برای سرعت مشخص از وسیله متحرک با استفاده از ثبت شتاب بدنه اصلی وسیله متحرک و شتاب سیستم چرخ وسیله متحرک محاسبه می‌شود. سپس طیف پاسخ شتاب نقطه تماسی در زمان سالم بودن پل مطابق روابط ارائه شده در بخش ۲-۳ محاسبه می‌شود. همین فرآیند را برای زمان بهره‌برداری پل که احتمال خرابی در آن وجود دارد انجام صورت می‌گیرد. مقایسه این دو تبدیل فوریه شتاب در زمان سالم و خراب بودن پل به کمک رابطه (۱۳) معیاری برای وجود خرابی در پل است. با توجه به اینکه هدف مشخص کردن مقدار تغییر فرکانس ارتعاشی پل به عنوان شاخص خرابی است بنابراین رابطه (۱۳) تنها در

تماسی در زمان سالم بودن پل به آن احتیاج است و $v_{1h} \leq v_{2h}$ از $v_{1d} \leq v_{2h}$ مقدار تبدیل فوریه پل سالم با سرعت v_{1d} رابطه زیر بدست می‌آید. بنابراین باید در زمان سالم و زمان بهره‌برداری پل وسیله متحرک با تعداد سرعت مختلف در یک محدوده معین سرعت بر روی پل به تعداد دفعات کافی عبور کند تا امکان پیش بینی طیف پاسخ نقطه تماسی و تشخیص خرابی در پل فراهم گردد.

$$S_{v1d} = (v_{1d} - v_{1h}) / (v_{2h} - v_{1h}) * S_{v2h} + (v_{2h} - v_{1d}) / (v_{2h} - v_{1h}) * S_{v1h} \quad (14)$$

\ddot{y} شتاب محاسباتی، $\sigma(\ddot{y})$ انحراف معیار آن، \dot{y} شتاب بعد از اعمال نویز و E_p مقدار سطح نویز و N_{noise} توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر انحراف معیار واحد است.

$$\dot{y}' = \dot{y} + E_p N_{noise} \sigma(\ddot{y})$$

که $\omega_{b1} = 3/61 \text{ Hz}$ اولین فرکانس ارتعاشی پل و $\omega_{v1} = 1/9 \text{ Hz}$ فرکانس ارتعاشی بدنه وسیله متحرک و $\omega_{v2} = 11/34 \text{ Hz}$ فرکانس ارتعاشی محور وسیله متحرک است. پل به ۲۵ قسمت مساوی تقسیم شده که با توجه به طول پل، طول هر المان برابر با یک متر است (شکل ۵).

متفاوت است. لازمه مقایسه کردن دو طیف برای تشخیص خرابی یکسان بودن سرعت عبور وسیله متحرک در هنگام خرابی و سالم بودن پل است. بنابر این برای تخمین طیف شتاب نقطه تماسی برای سرعت‌های در زمان بهره‌برداری از درونبایی خطی بین دو سرعت معلوم در زمان سالم بودن پل استفاده می‌شود بدین صورت که اگر v_{1h} و v_{2h} دو سرعتی باشند که مقدار تبدیل فوریه نقطه تماسی آنها در زمان سالم بودن پل بتدریب S_{v1h} و S_{v2h} باشد و v_{1d} سرعتی باشد که مقدار تبدیل فوریه نقطه

۷-۲- اعمال شرایط محیطی برداشت داده

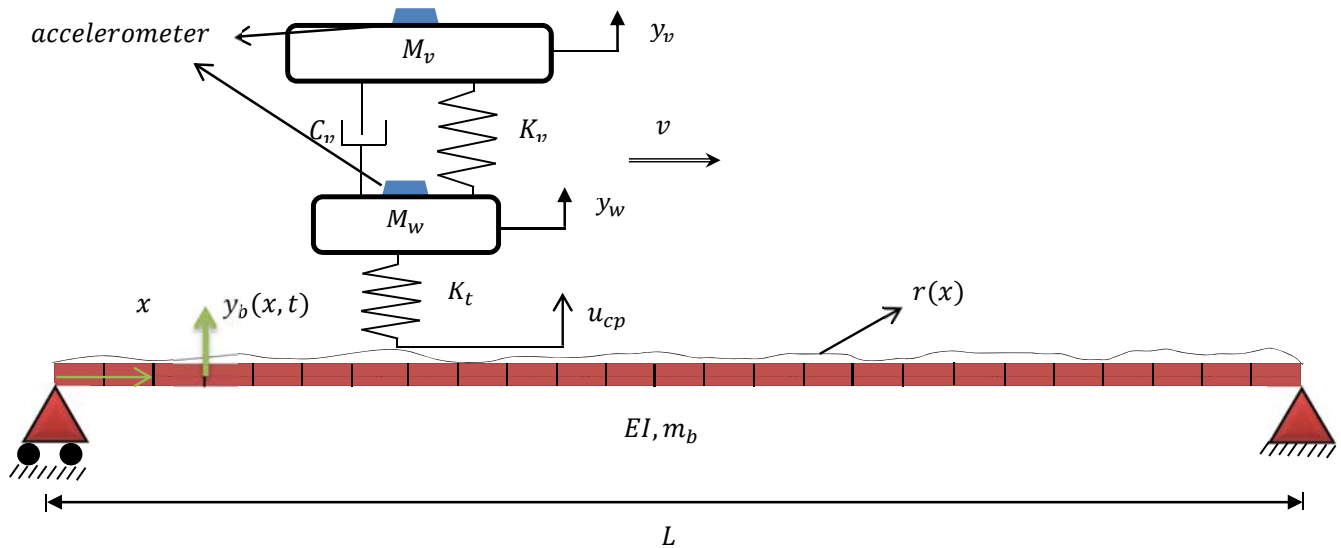
برای اعمال کردن شرایط واقعی و اثرات محیطی و اغتشاشات ایجاد شده در برداشت شتاب، شتاب محاسباتی را با استفاد از رابطه زیر به آنها نویز سفید گوسی اضافه شده است. در این رابطه

$$(15)$$

۳- مطالعه موردی

۳-۱- معرفی مدل عددی

برای بررسی نحوه استخراج فرکانس پل از سیستم جرم و فنر که دو شتاب‌سنج بر روی وسیله متحرک نصب شده استفاده شده است. وسیله متحرک با مشخصات $M_v = 8900 \text{ kg}$ ، $k_t = c_v = 40 \text{ kNs/m}$ ، $k_v = 2000 \text{ KN/m}$ ، 1100 kg ، $E = 27/5 \text{ Gpa}$ ، $L = 25 \text{ m}$ و پل بطول 3500 KN/m ، $m_b = 2000 \text{ kg/m}$ و $I = 0/15 \text{ m}^4$ در نظر گرفته شده



شکل ۵. نمای از وسیله متحرک مجهز به سنسور شتاب سنج و پل

۲-۳- معرفی سناریوهای تشخیص خرابی به کمک تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی

مقدار متفاوت ۲، ۴ و ۶ درصد نویز برای شتاب‌های محاسباتی با توجه به رابطه (۱۵) در نظر گرفته شده است. محل خرابی ایجاد شده در پل مورد بررسی در این سناریو دو حالت مختلف شامل ۱- خرابی در المان شماره ۱۳ (وسط دهانه پل) و ۲- خرابی در المان شماره ۸ (۱/۳ دهانه ابتدایی پل) لحاظ گردید که به طور مجزا مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه‌ای از سناریوهای مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. سرعت ثبت داده برابر با ۱۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است.

دو سناریو برای بررسی تشخیص خرابی در پل به کمک طیف پاسخ نقطه تماسی در نظر گرفته شده که در هر دو مورد، سرعت حرکت وسیله متحرک در محدوده ۵ الی ۱۰ متر بر ثانیه است. در سناریو اول سطح روسازی پل مسطح در نظر گرفته شده و از اثر شرایط محیطی (نویز) صرف نظر شده است. خرابی در المان وسط دهانه پل در نظر گرفته شده و مقادیر خرابی با توجه به رابطه (۹) برابر مقادیر مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. در سناریو دوم با همان درصد خرابی‌های سناریو اول و با در نظر گرفتن خرابی روسازی و سه

جدول ۱. مشخصات سناریوهای مختلف

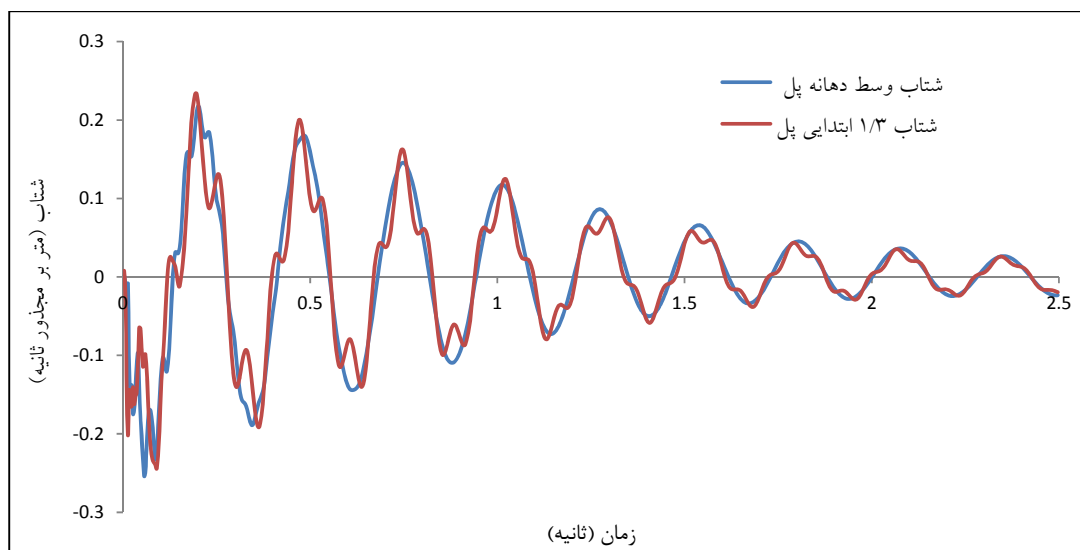
سناریو اول	سناریو دوم		مشخصات
	ب	الف	
$r(x) = 0$	$r(x)$	$r(x)$	نوع روسازی
$\alpha_{13} = 0/95,0/9,0/85$ $0/8,0/75,0/7$	$\alpha_8 = 0/95,0/9,0/85$ $0/8,0/75,0/7$	$\alpha_{13} = 0/95,0/9,0/85$ $0/8,0/75,0/7$	شدت و محل خرابی
$E_p = 0\%$	$E_p = 2,4,6\%$	$E_p = 2,4,6\%$	مقدار نویز در شتاب

۴- نتایج و بحث

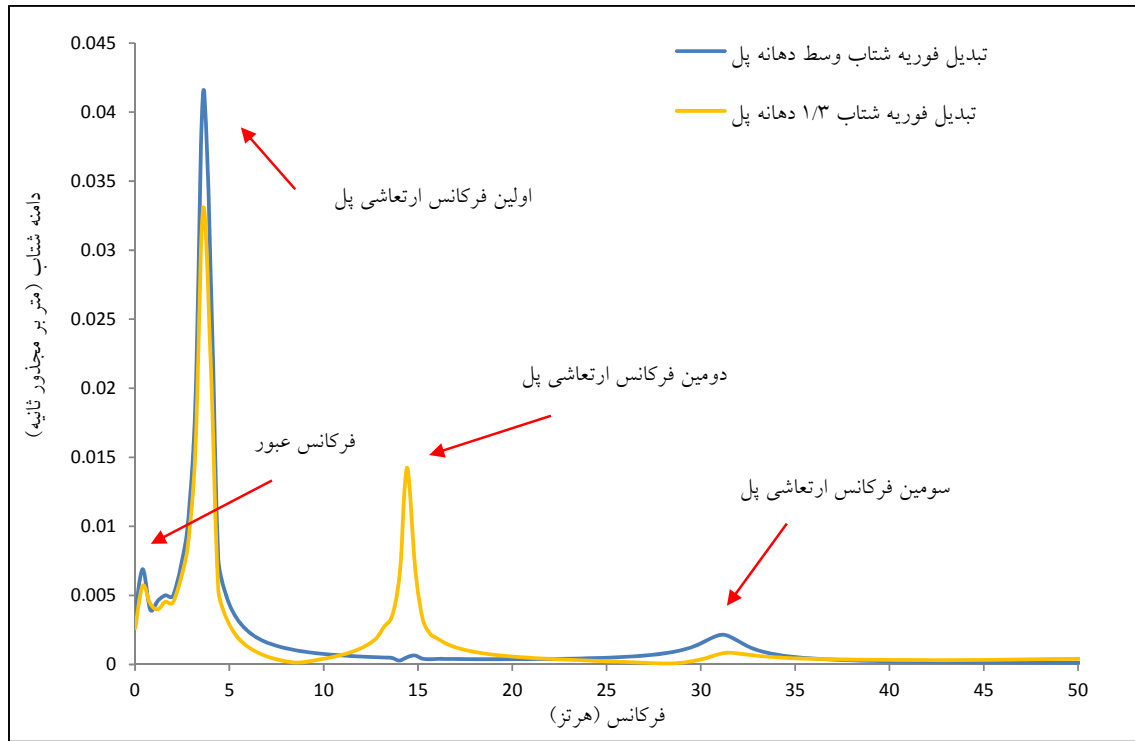
۴-۱- امکان سنجی تشخیص خرابی به کمک تبدیل فوریه پاسخ نقطه تماسی

با مشخصات بخش ۳-۱ و سرعت ثابت ۱۰ متر بر ثانیه و با فرض مسطح بودن سطح روسازی پل رسم شده است.

در شکل ۶ شتاب قائم وسط دهانه پل و ۱/۳ ابتدایی پل و در شکل ۷ تبدیل فوریه آنها برای عبور وسیله متحرک بر روی پل



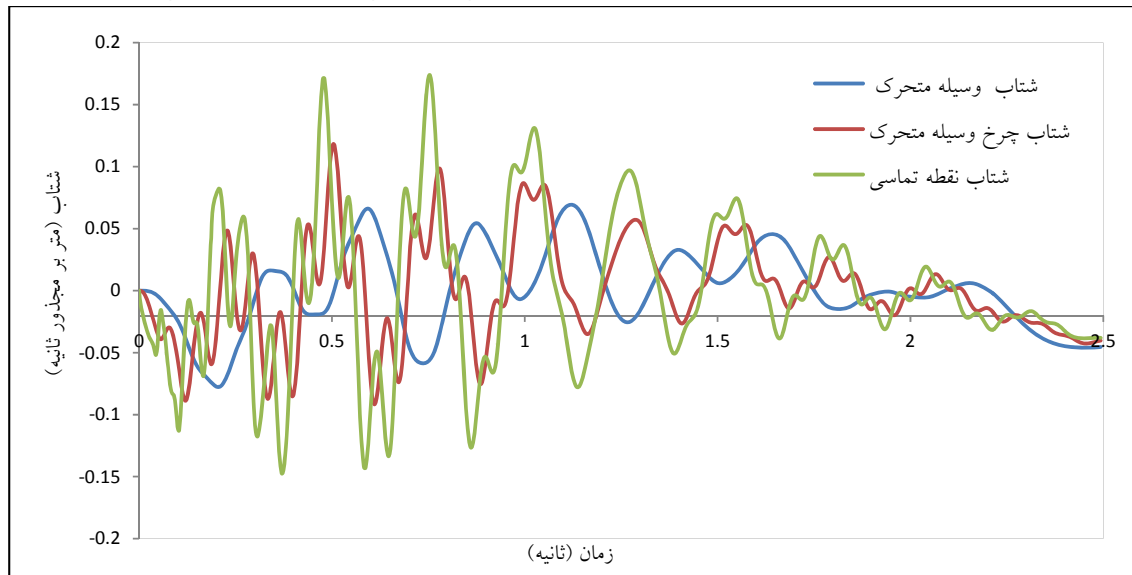
شکل ۶. شتاب قائم وسط دهانه و ۱/۳ ابتدایی پل برای حرکت وسیله متحرک با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۷. تبدیل فوریه شتاب قائم وسط دهانه پل و ۱/۳ ابتدایی دهانه پل

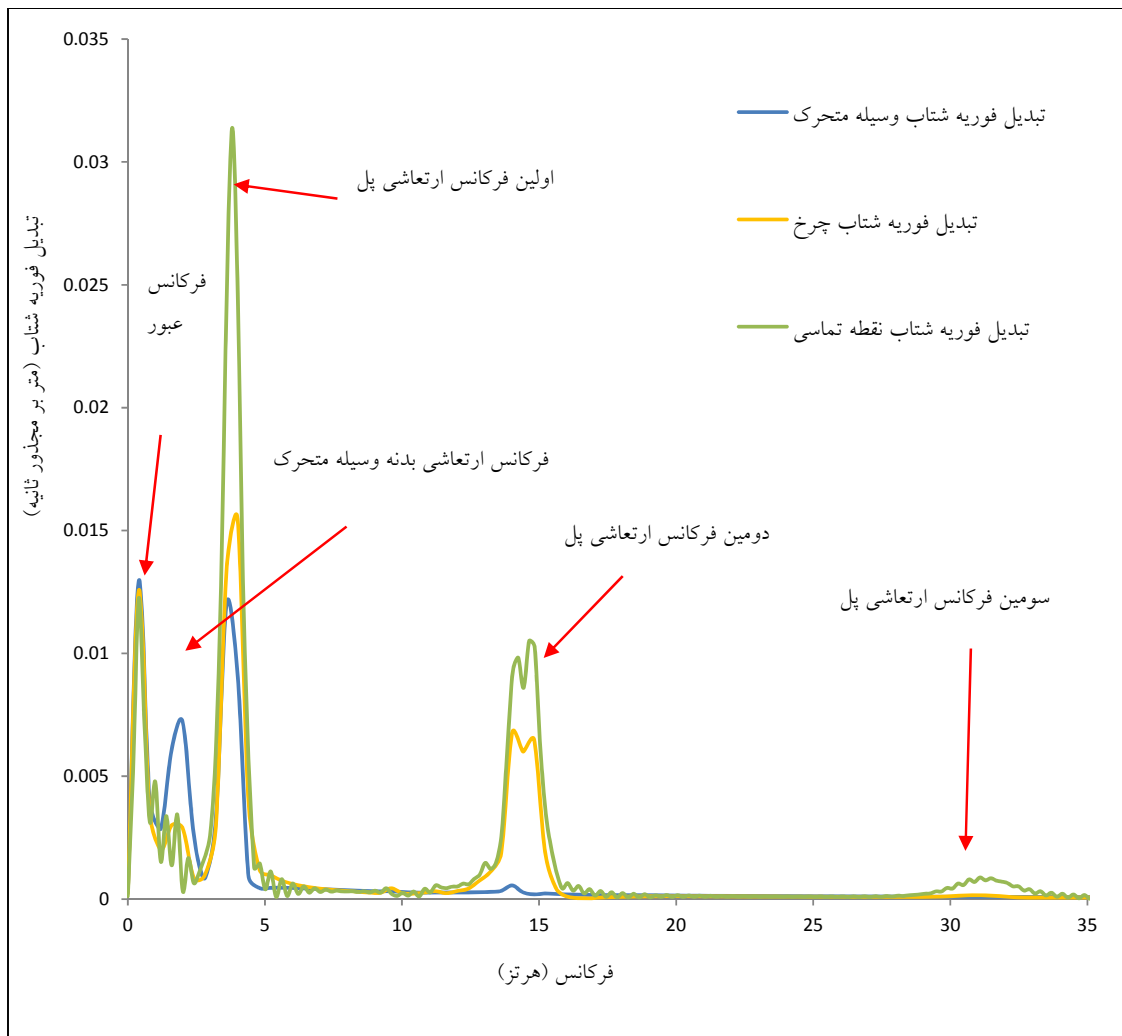
ساده در تبدیل فوریه شتاب وسط دهانه پل فرکانس‌های زوج تأثیری ندارند. در تبدیل فوریه شتاب قائم ۱/۳ دهانه ابتدایی پل فرکانس‌های اول و دوم پل به وضوح مشخص است. همانطور که مشخص است فرکانس‌های ارتعاشی وسیله متحرک با عنایت به سطح بودن سطح روسازی در طیف پاسخ پل تأثیری ندارد.

همانطور که در شکل ۷ مشخص است فرکانس‌های متعددی در هر دو شتاب وسط دهانه و ۱/۳ ابتدایی پل حضور دارد. فرکانس عبور برابر با $2\pi v/L$ است که ناشی از عبور وسیله متحرک و به نوعی فرکانس بارگذاری است (Yang, Lin and Yau, 2004). با توجه شکل سینوسی شکل مودهای پل دو سر



شکل ۸. شتاب قائم بدنه اصلی، چرخ و نقطه تماسی وسیله متحرک

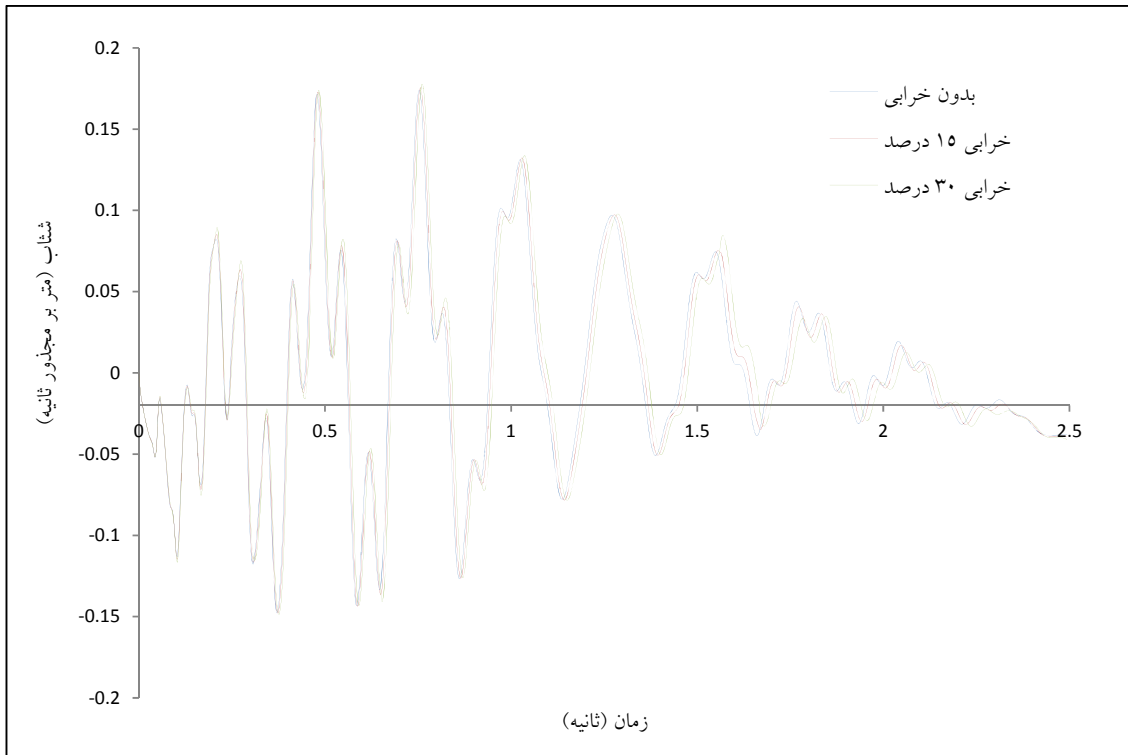
در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب شتاب و تبدیل فوریه شتاب بدنه، چرخ و نقطه تماسی وسیله متحرک رسم شده است.



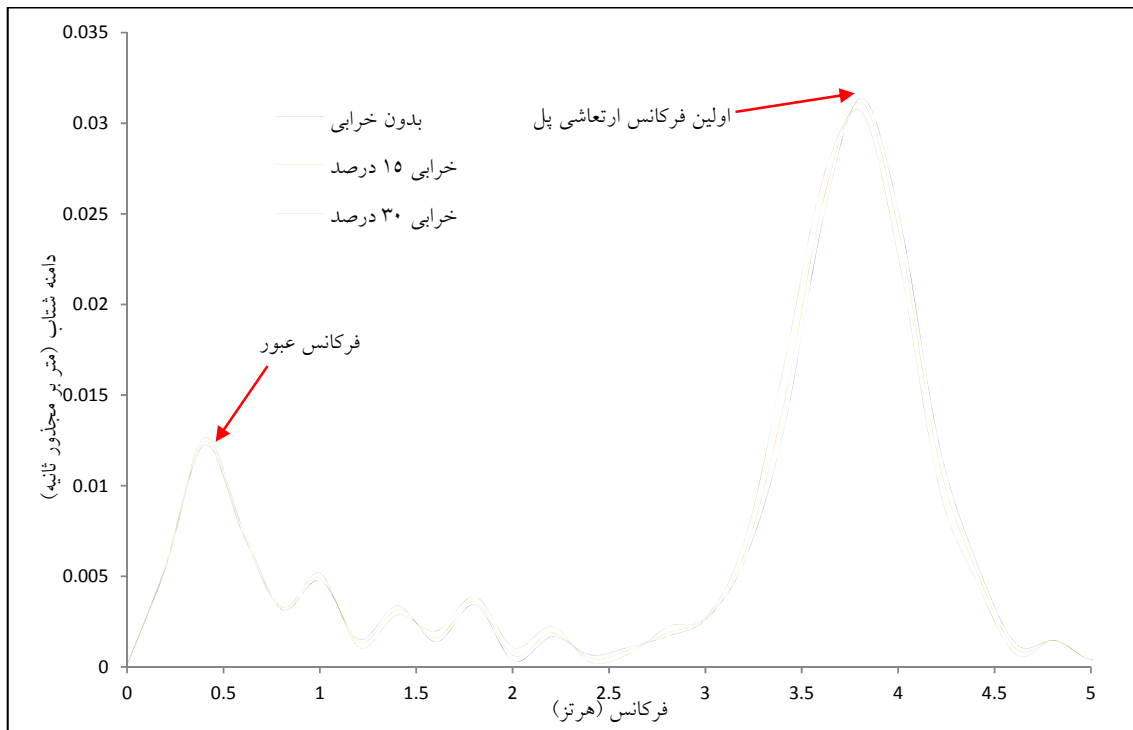
شکل ۹. تبدیل فوریه قائم بدنه اصلی، چرخ و نقطه تماسی وسیله متحرک

مشخص است وجود خرابی منجر به کاهش سختی و متناظر با آن کاهش فرکانس ارتعاشی پل شده است. در شکل ۱۱ هر کدام از تبدیل فوریه‌ها با یکدیگر اختلاف دارند ولی آوردن تمام نمودار تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی در رابطه ۱۳ معنای خاصی را با خود ندارد. اگر رابطه ۱۳ را در تنها در محدوده فرکانس پل اعمال کنیم مشاهده می‌شود مقدار بدست آمده همانطور که در شکل ۱۱ مشخص‌کننده تغییرات فرکانس و بالطبع خرابی خواهد بود. برای مقایسه تبدیل فوریه‌های مختلف تنها در محدوده فرکانس اول از رابطه استفاده می‌شود بدین منظور فقط تبدیل فوریه در محدوده ۰/۹ ماکزیمم دامنه شتاب اولین فرکانس پل مقایسه شده است.

همان‌طورکه در شکل ۹ مشخص است پاسخ شتاب بدنه و چرخ وسیله متحرک حاوی فرکانس پل و فرکانس وسیله متحرک و فرکانس عبوری است ولی شتاب نقطه تماسی تنها حاوی فرکانس عبور و فرکانس ارتعاشی پل است. از این‌رو استفاده از تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی برای تشخیص خرابی در پل بدون تداخل فرکانس‌های وسیله متحرک با سهولت بیشتری همراه خواهد بود. در شکل ۱۰ شتاب نقطه تماسی برای حالت بدون خرابی ($\alpha_i = 0$) و خرابی ۱۵ درصد ($\alpha_{13} = 0/15$) و ۳۰ درصد ($\alpha_{13} = 0/30$) همان مابین پل و تبدیل فوریه آنها با این درصد خرابی‌ها در شکل ۱۱ رسم شده است. همان‌طور که



شکل ۱۰. شتاب نقطه تماسی برای درصد خرابی‌های مختلف المان وسط دهانه پل

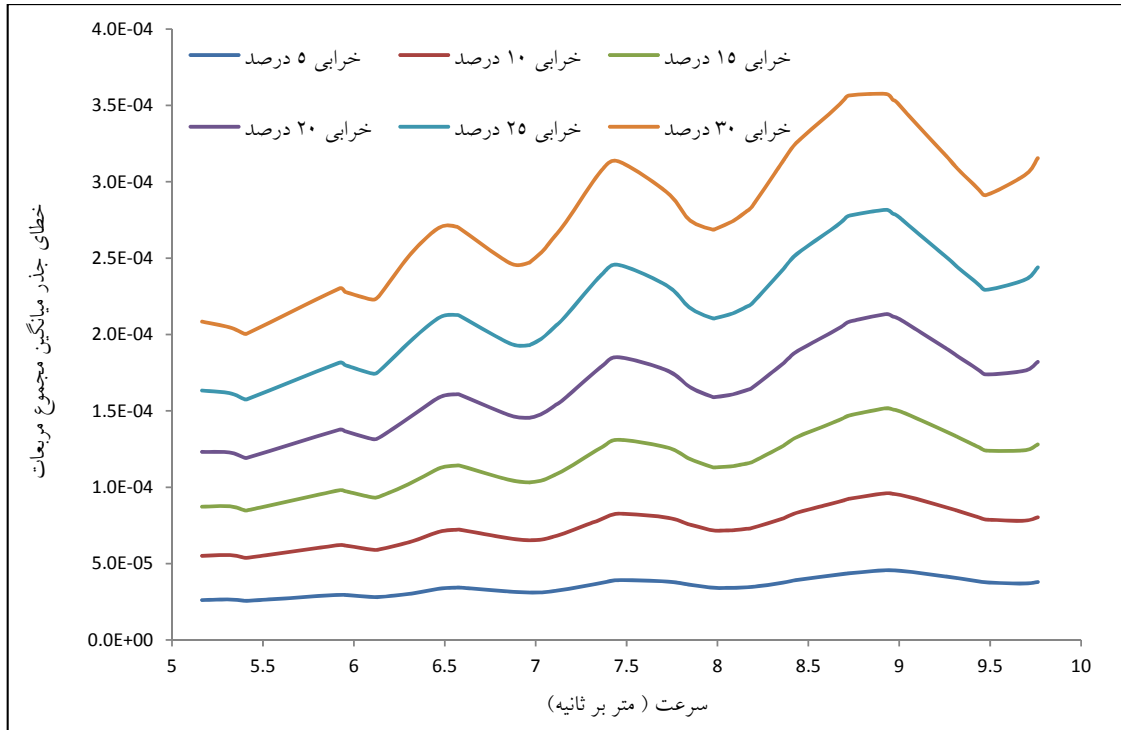


شکل ۱۱. تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی برای درصد خرابی‌های مختلف المان وسط دهانه پل

۲-۴- تشخیص خرابی با در نظر گرفتن پروفیل روسازی مسطح برای پل (سناریو الف)

محاسبه شده و سپس تبدیل فوریه نقطه تماسی برای ۵۰ سرعت متفاوت برای زمان بهره‌برداری (خرابی پل) به کمک رابطه ۱۴ محاسبه شده و با تبدیل فوریه نقطه تماسی در زمان خرابی مقایسه شده و در شکل ۱۲ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است مقایسه تبدیل فوریه نقطه تماسی در دو حالت وجود سالم بودن پل و خراب بودن پل قابلیت تشخیص وجود خرابی و معین کردن شدن خرابی را دارد.

برای استفاده از معیار تغییرات تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل و وسیله متحرک برای تشخیص خرابی در پل با مشخصات بخش ۳-۱ در نظر گرفته می‌شود. خرابی برای المان وسط پل بصورت رابطه شماره ۹ و ۶ حالت خرابی متفاوت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. سرعت حرکت وسیله متحرک بین ۵ الی ۱۰ متر بر ثانیه است و ابتدا تبدیل فوریه برای ۵۰ سرعت متفاوت شتاب نقطه تماسی برای زمان سالم بودن

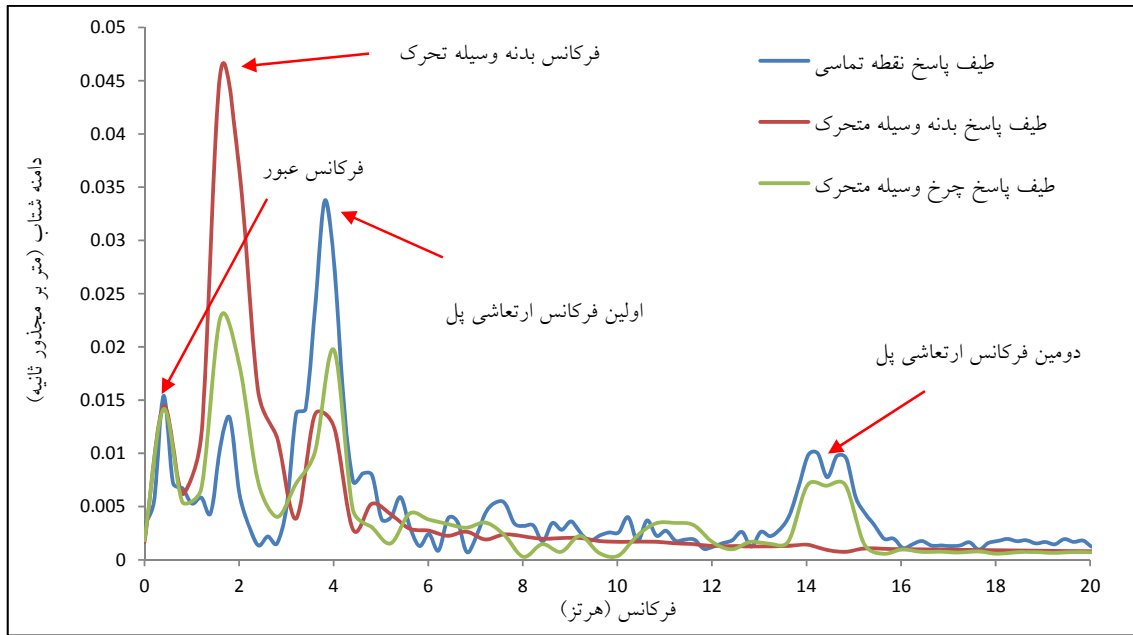


شکل ۱۲. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی

۳-۴- تشخیص خرابی در پل با وجود ناهمواری در روسازی پل و وجود نویز در شتاب

روسازی در طول پل بیشتر از پل قابلیت تحریک بدنه و چرخ وسیله متحرک را دارد. این تغییر در تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی کمتر اتفاق افتاده است و هنوز کماکان با وجود سرعت عبور ۱۰ متر بر ثانیه وسیله متحرک بر روی پل که برای پایش غیر مستقیم سرعت بالایی به شمار می‌رود، فرکانس غالب هنوز فرکانس اولیه پل است. مقایسه این سه تبدیل فوریه در شکل ۱۳ نشان دهنده قابلیت استفاده از شتاب نقطه تماسی برای بررسی وضعیت پل سلامت است.

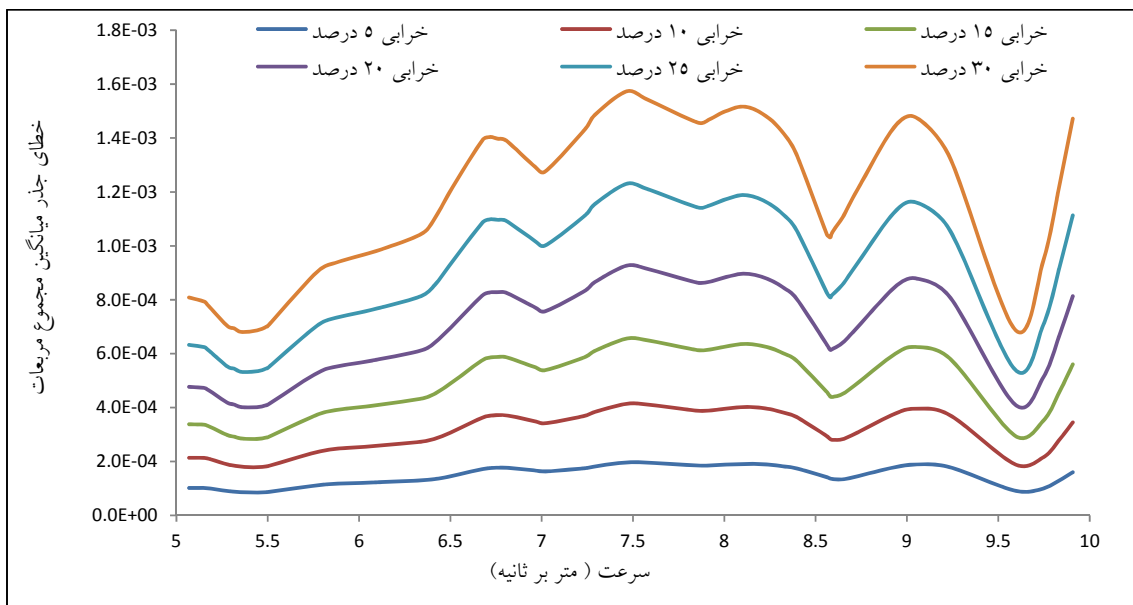
شکل ۱۳ تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی برای پل و وسیله متحرک با مشخصات بخش ۳-۱ که با سرعت ثابت ۱۰ متر بر ثانیه حرکت می‌کند و با در نظر گرفتن ناهمواری روسازی پل نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است خرابی روسازی تاثیر زیادی بر روی تبدیل فوریه شتاب چرخ و بدنه وسیله متحرک دارد به نحوی که در شتاب بدنه وسیله متحرک و چرخ فرکانس غالب از فرکانس اولیه پل (شکل ۷) به فرکانس اصلی بدنه وسیله متحرک انتقال یافته است. خرابی



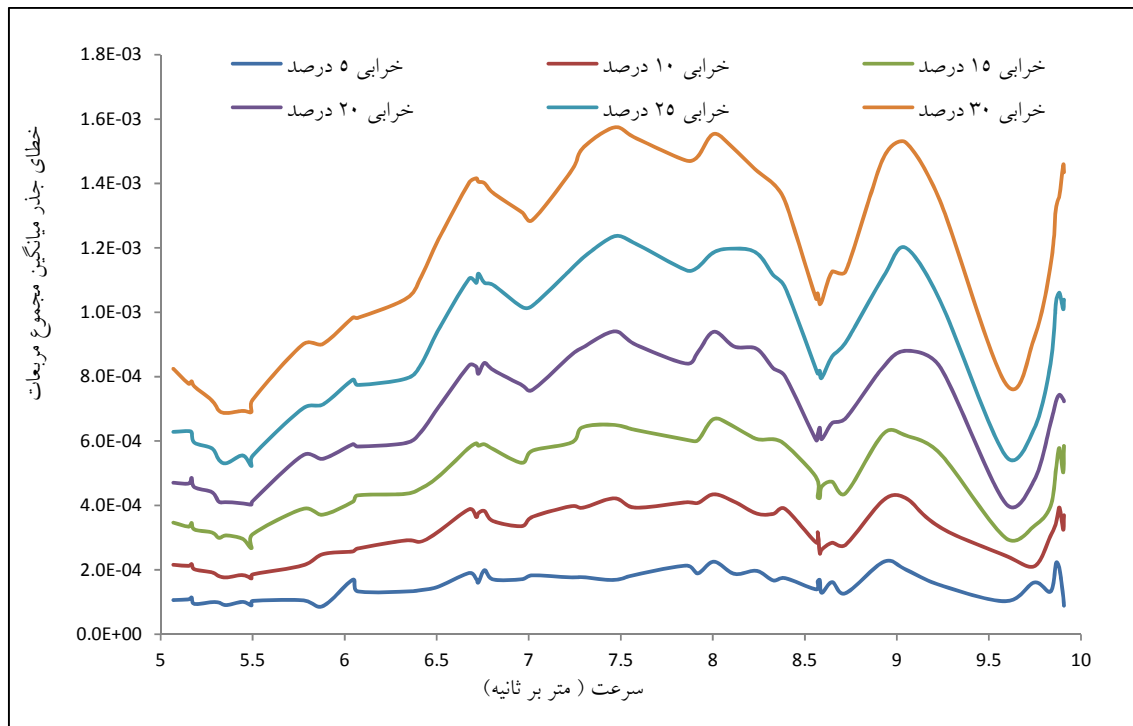
شکل ۱۳. تبدیل فوریه شتاب بدنه اصلی، چرخ و نقطه تماسی وسیله متحرک

۳-۴-۱- خرابی در ۱/۲ دهانه پل (سناریو دوم-الف)

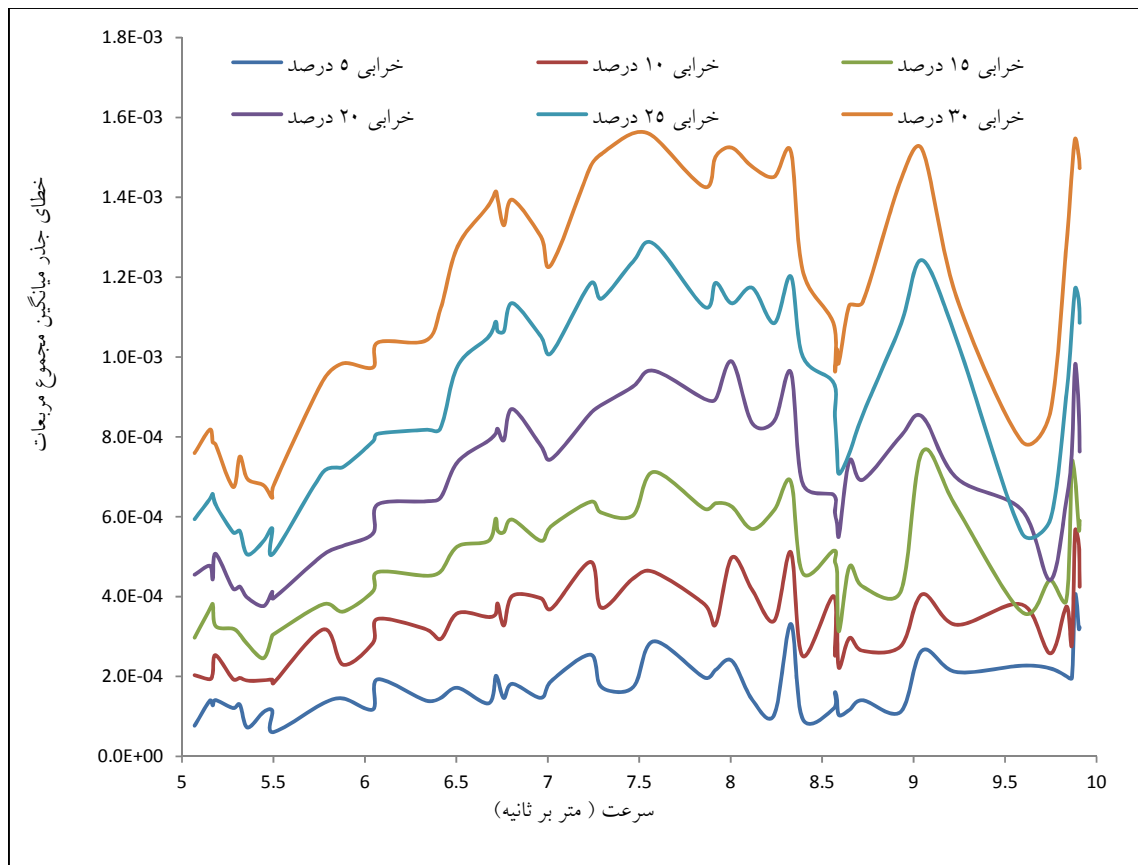
در این حالت المان سیزدهم از پل با درصد خرابی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بر اساس رابطه (۹) و حالت‌های بدون نویز و با ۲، ۴ و ۶ درصد نویز مورد بررسی قرار گرفته است.



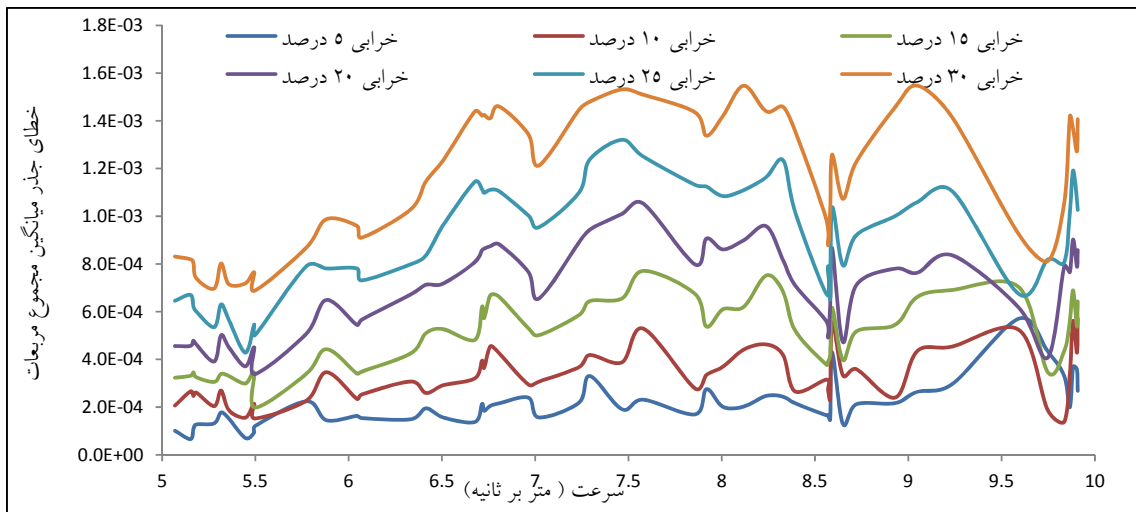
شکل ۱۴. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی وسط پل بدون نویز



شکل ۱۵. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی وسط پل با ۲ درصد نویز



شکل ۱۶. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف وسط پل خرابی با ۴ درصد نویز



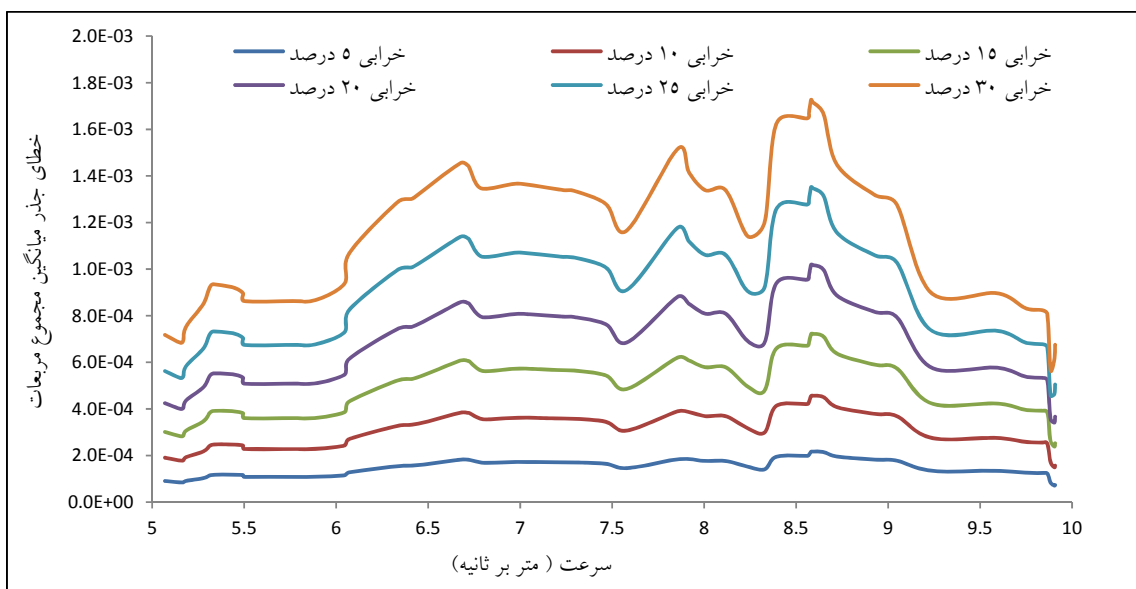
شکل ۱۷. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی وسط پل با ۶ درصد نویز

می‌شود (Yang, Li and Chang. 2012; Yang et al. 2018).

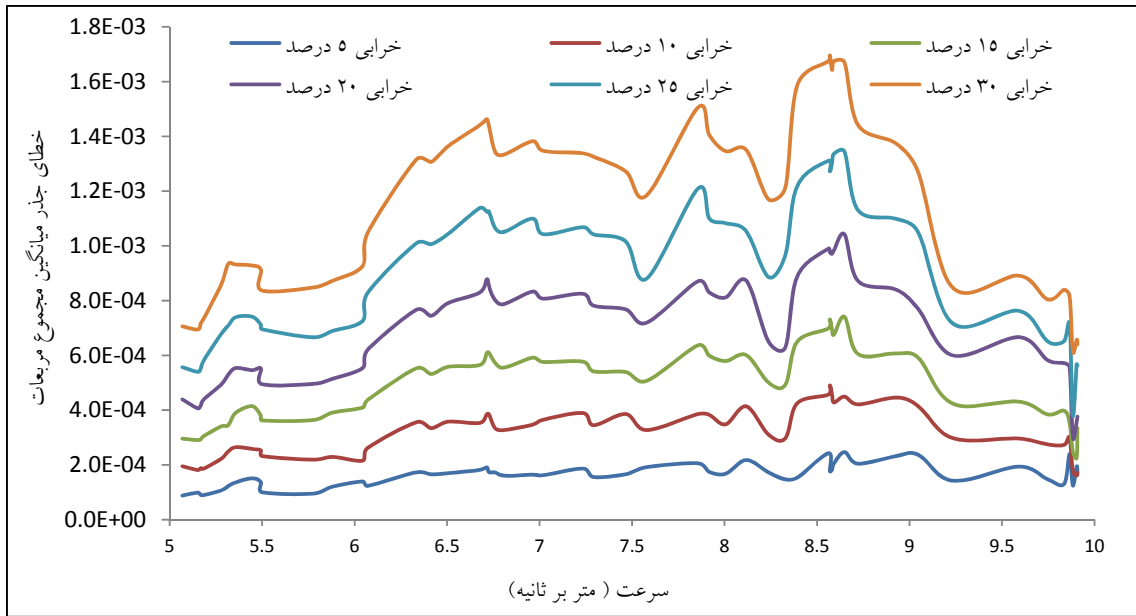
همانطور که در اشکال ۱۴-۱۷ مشخص است در زمان عدم نویز با افزایش سرعت از ۷ متر بر ثانیه روند نمودارها تغییر کرده که با اعمال نویز و افزایش درصد آن این روند تشدید شده است به نحوی که برای درصد نویز ۶ درصد نمودارها برای درصد خرابی مختلف و سرعت بیشتر از ۷ متر بر ثانیه با یکدیگر تداخل پیدا کرده‌اند. لازم بذکر است که افزایش سرعت با وجود خرابی روسازی باعث افزایش اثر خرابی روسازی در پاسخ وسیله متحرک می‌شود استفاده از روش غیر مستقیم با مشکل همراه

۴-۳-۲- خرابی در ۱/۳ ابتدایی پل (سناریو ۲-ب)

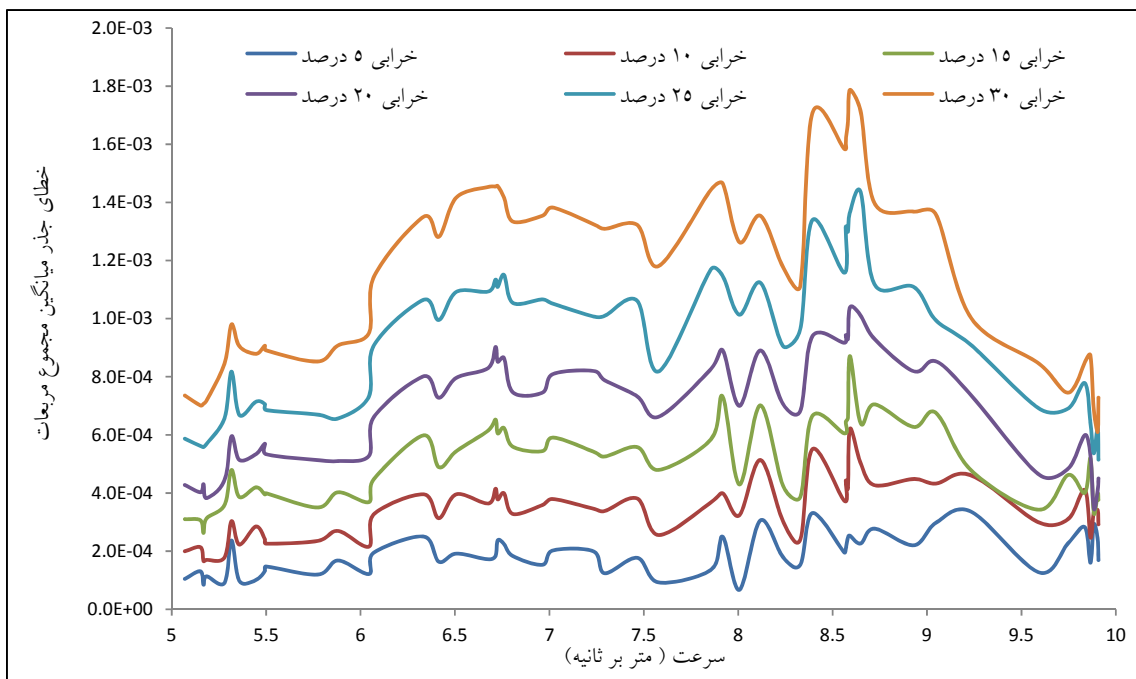
در این حالت المان هشتم از پل و یا به عبارتی ۱/۳ دهانه پل با درصد خرابی مختلف ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد بر اساس رابطه ۹ با چهار حالت بدون نویز و ۲، ۴ و ۶ درصد نویز مورد بررسی قرار گرفته است.



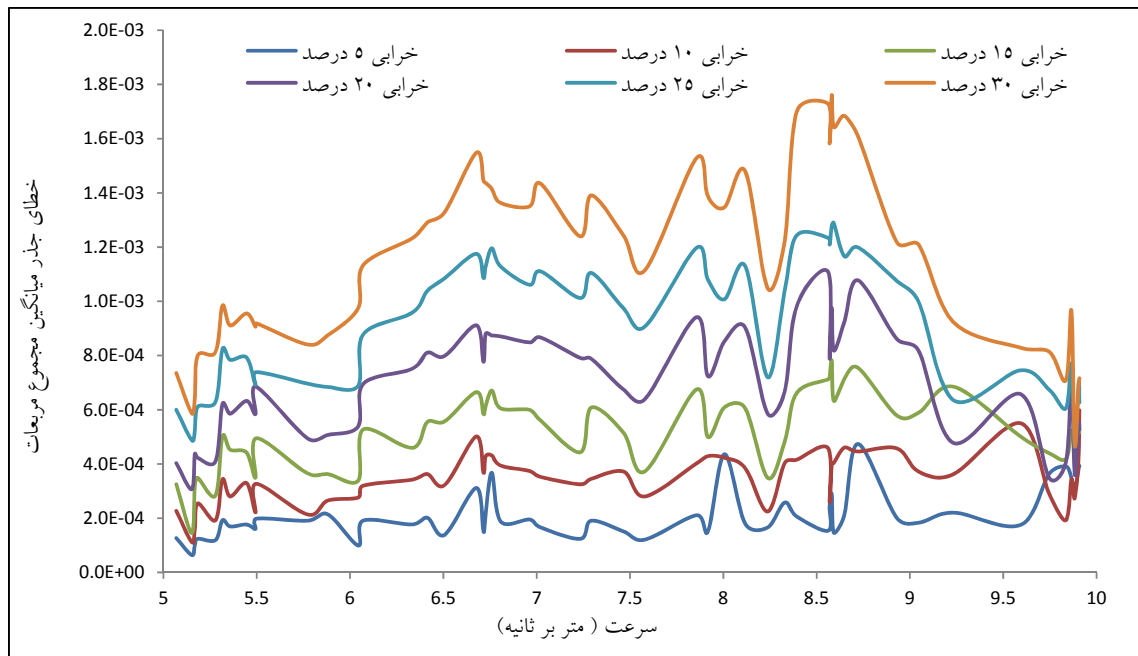
شکل ۱۸. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی ۱/۳ دهانه پل بدون نویز



شکل ۱۹. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی ۱/۳ دهانه پل با ۲ درصد نوبز



شکل ۲۰. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی ۱/۳ دهانه پل با ۴ درصد نوبز



شکل ۲۱. مقدار RMSE تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی پل سالم و پل با درصد مختلف خرابی ۱/۳ دهانه پل با ۶ درصد نویز

مستقیم کاهش داد. در این تحقیق نشان داده شد که مقایسه طیف پاسخ نقطه تماسی در زمان سالم بودن پل و در زمان خرابی پل در محدوده فرکانس ارتعاشی اصلی پل با استفاده از روش خطای جذر میانگین مربعات میانگین، این قابلیت را دارد که از آن برای نمایندگی تغییر فرکانس پل و بالطبع تشخیص وجود خرابی و شدت خرابی استفاده کرد. همچنین در این تحقیق عملکرد استفاده از تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی وسیله متحرک با وجود در نظر گرفتن ناهمواری روسازی و درصدهای مختلف نویز در شتابهای ثبت شده بررسی شد. نتایج بدست آمده قابل قبول بوده و می‌تواند نیاز به استفاده از تجهیزات خاص جهت حذف اثر خرابی روسازی را مرتفع نماید. بر اساس نتایج تحقیق با افزایش سرعت حرکت وسیله متحرک، توانایی روش غیر مستقیم برای تشخیص خرابی و شدت آن در زمان وجود ناهمواری در سطح روسازی کاهش می‌یابد.

همانطور که در اشکال ۱۸-۲۱ مشخص است با وجود اینکه در محدوده ۱/۳ ابتدایی پل و المان هشتم خرابی ایجاد شده و با توجه به اینکه خرابی اثر کمتری در تغییر فرکانس پل دارد ولی تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی قابلیت تشخیص خرابی و شدت خرابی را دارد. کماکان افزایش سرعت منجر به کاهش توانایی تشخیص و شدت خرابی بکمک تبدیل فوریه شتاب نقطه تماسی شده است.

۵- نتیجه گیری

با استفاده از روش غیر مستقیم برای پایش سلامت پل‌ها، امکان ارزیابی وضعیت پل با سرعت و هزینه کمتری نسبت به روش‌های مستقیم فراهم می‌گردد. فیلتر شدن فرکانس‌های بزرگتر از فرکانس وسیله متحرک در روش غیر مستقیم از جمله مشکلاتی است که بویژه در زمان وجود ناهمواری در روسازی پل وجود دارد. استفاده از شتاب نقطه تماسی این قابلیت را دارد که اثر فرکانس‌های ارتعاشی وسیله متحرک را در روش غیر

۶- پانویس

- 1- Bridge Health Monitoring
- 2-Indirect
- 3-Drive-by
- 4-Vehicle Scanning Method

- 5- Contact Point
- 6- Closed Form
- 7-Backward Procedure
- 8-Finite Difference
- 9-Pavement Roughness
- 10-Root Mean Square Error

۷- مراجع

- estimation approach. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 10, 815–831.
- Robert Corbally & Abdollah Malekjafarian (2021). Examining changes in bridge frequency due to damage using the contact-point response of a passing vehicle. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, Vol. 6, No. 3, 148–158.
- X. Q. Zhu, S.S. Law, L. Huang, S.Y. Zhu (2018). Damage identification of supporting structures with a moving sensory system. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 415, 111-127.
- Y. B. Yang, F. Xiong, Z. L. Wang, and H. Xu (2020). Extraction of Bridge Frequencies Inclusive of the Higher Modes by the ESMD Using the Contact-Point Response. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. Vol. 20, No. 4, 2050045-2050074.
- Y.B. Yang, B. Zhang, Y.N. Chen, Y. Qian, Y.T. Wu, (2019). Bridge damping identification by vehicle scanning method. *Engineering Structures*. Vol.183, 637–645.
- Y.B. Yang, Y.C. Li, K.C. Chang, (2014). Constructing the mode shapes of a bridge from a passing vehicle: A theoretical study. *Smart Structures and Systems*, Vol. 13, No. 5, 797–819.
- Yang Y. B, Lin C., Yau J., (2004). Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 272, 471–493.
- Yang, Y. B., Chen, W. F., Yu, H. W., & Chan, C. S. (2013). Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies. *Journal of Engineering Structures*, 57, 222–231.
- Yang, Y. B., Xu, H., Zhang, B., Xiong, F., & Wang, Z. L. (2020). Measuring bridge frequencies by a test vehicle in non-moving and moving states. *Journal of Engineering Structures*, 18(5), 109859.
- Yang, Y. B., Zhang, B., Qian, Y., & Wu, Y. (2018). Contact-point response for modal
- Bin Zhang, Yao Qian, Yuntian Wu, Y.B. Yang (2018). An effective means for damage detection of bridges using the contact-point response of a moving test vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 419, 158-172.
- Cantero, D., Mc Getrick, P., Kim, C. W., OBrien, E. (2019). Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties. *Journal of Engineering Structures*, 187, 209–219.
- H. Xu, C.C. Huang, Z.L. Wang, K. Shi, Y.T. Wu, Y.B. Yang (2021). Damped test vehicle for scanning bridge frequencies: Theory, simulation and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 506, 116-155.
- Hashlamon, I., Nikbakht, E., Topa, A., & Elhatab, A. (2021). Numerical Parametric Study on the Effectiveness of the Contact-Point Response of a Stationary Vehicle for Bridge Health Monitoring. *Applied Sciences*, 11(15), 7028.
- International Standard Organization (ISO), (1995). Mechanical Vibration-Road Surface Profiles, Reporting of Measured Data, *ISO 8608:1995(E)*.
- J. Keenahan, E. J. OBrien, P. J. McGetrick, and A. Gonzalez (2014). To use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping. *Structural Health Monitoring*, Vol. 13, No. 2, 143–157.
- J.P. Yang, W.C. Lee (2018). Damping effect of a passing vehicle for indirectly measuring bridge frequencies by EMD technique, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. Vol.18 (1), 1850008.
- Lin CW, Yang YB. (2005). Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification. *Journal of Engineering Structures*, 27, 1865–78.
- Rajdip Nayek, Sriram Narasimhan (2020). Extraction of contact-point response in indirect bridge health monitoring using an input

-Yang, Y.B. Yau, J.D.; Yao, Z.; Wu, Y.S. (2004). Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: With Applications to High-Speed Railways. *World Scientific*, Singapore.

-Y. Zhang, H.S. Zhao, S.T. Lie, (2019). Estimation of mode shapes of beam-like structures by a moving lumped mass. *Engineering Structures*. Vol.180, 654–668.

identification of bridges by a moving test vehicle. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. Vol. 18, No. 5 1850073.

-Yang, Y.B.; Li, Y.C.; Chang, K.C. (2012). Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: A theoretical study. *Acta Mechanica*., Vol. 223, 1851–1861.

Indirect Bridge Damage Detection Based on Contact Point of Vehicle with Bridge

Mohsen Mohammad Karimi Hossein Abadi, Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Reza Morshed, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: morshed@yazd.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

Bridges are pivotal infrastructures in each country, and the maintenance and damage detection in these structures play constructive roles in enhancing road safety and service life. The indirect bridge health monitoring methods, in which sensors are installed on the moving vehicle, become considerably rapid and efficient since there is no need for sensor installation on the bridge elements. However, the responses recorded by the vehicle comprise combined responses of moving vehicle and bridge accelerations, causing further analyses and calculations for decomposing accelerations. The effects of dynamic parameters on acceleration at the vehicle-bridge contact points are considerably lower than that of the acceleration of moving vehicle's components; therefore, the bridge health condition can be more easily evaluated according to the acceleration at contact points compared to the acceleration recorded by moving vehicle's components. In this study, the Fourier transform of the vertical acceleration at the contact point of the moving vehicle and bridge was used to assess the bridge health condition. First, the vertical acceleration at the contact point was calculated using the backward procedure for moving vehicle with different speeds crossing over the undamaged bridge. Second, the Fourier transform was applied to acceleration results. Finally, the Fourier transform of the acceleration at the contact point for different speeds of the moving vehicle was predicted and compared against the corresponding accelerations of the undamaged bridge to assess the accuracy of the proposed method in determining damage levels in the bridge. The results indicate that the bridge damage level can be properly determined using the Fourier transform of the responses at the contact point of the bridge and moving vehicle at different speeds. Moreover, the suggested approach leads to accurate predictions of damage levels in the bridge even in the case of noisy data and substantial damage on the bridge pavement surface.

Keywords: Bridge Health Monitoring, Indirect Method, Pavement Roughness, Vehicle Bridge Interaction