

شناسایی حسگر مطلوب برای تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پلها با استفاده از روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری

حمیدرضا احمدی، دانش آموخته دوره دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران
فرهاد دانشجو (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E- mail: danesh_fa@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۱۰

دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۰۷

چکیده:

روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری، روش‌هایی کاربردی اما ساده برای شناسایی آسیب در پایه‌های بتنی پلها هستند. در این روشها برای اولین بار از توابع زمان-فرکانس مربعی برای شناسایی آسیب در پلها استفاده شده است. در روش‌های سیگنالی، تشخیص آسیب با پیش رفتار سازه امکان‌پذیر می‌شود و جهت اندازه‌گیری رفتار سازه از حسگرها استفاده می‌گردد. با توجه به تنوع حسگرها لازم است متناسب با روش بکار گرفته شده برای تشخیص آسیب، حسگر مورد استفاده برای اندازه‌گیری رفتار سازه تعیین شود و حساسیت روش تشخیص آسیب به نوع سیگنال‌های ثبت شده مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس برای شناسایی آسیب در پایه‌های بتنی پلها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین حسگرهای جابجایی سنج، سرعت سنج و شتاب سنج برای شناسایی آسیب در پایه‌های بتنی پلها، با استفاده از روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت حسگر مطلوب شناسایی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شده که در صورت کاربرد سیگنال‌های پاسخ ثبت شده با حسگر جابجایی سنج در روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و یا تانسوری، در همه مواقع، پایه آسیب‌دیده به درستی شناسایی شده، لیکن با استفاده از سیگنال‌های ثبت شده با حسگر سرعت سنج و شتاب سنج به ترتیب در $88/9\%$ و $94/4\%$ محل آسیب به طور صحیح گزارش شده است. ضمناً تأثیر فاصله نصب حسگرها تا محل آسیب‌دیده و اثر آن در نتایج مورد مطالعه بررسی شده است. مطابق با نتایج محاسبه شده با کاهش فاصله نصب هر یک از حسگرهای جابجایی سنج، سرعت سنج و یا شتاب سنج با محل آسیب، توانایی و دقت روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری در شناسایی پایه آسیب‌دیده افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جابجایی سنج، سرعت سنج، شتاب سنج، روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، روش تانسوری

۱. مقدمه

در آیین‌نامه‌ها، بازرسی پل‌ها از موضوعات بسیار مهم و ضروری است که هدف از آن تعیین و شناسایی آسیب‌ها و ترک‌های محتمل موجود در پل است.

با شناسایی آسیب‌های موجود، ضمن تعمیر بموقع آنها با هزینه بسیار کمتر، ایمنی پل نیز نسبت به بارهای مختلف ترافیکی و محیطی افزایش می‌یابد [Kunwar et al. 2013, Kim et al.]. [2013, Brinckerhoff, 1992, Parke and Hewson, 2008] به عنوان مثال پس از فرو ریختن پل سیلور کریک (Silver Creek) در اوهایو در سال ۱۹۶۷، توجه بیشتری نسبت به بازرسی و نگهداری پل‌ها صورت گرفت.

این موضوع موجب شد که آیین‌نامه آشتو (AASHTO) در سال ۱۹۷۱ مقررات مربوط به نگهداری از پل‌ها را منتشر کند [AASHTO, 1990].

با توجه به محدودیت‌های روش‌های استاتیکی - پایه برای سلامت‌سنجی سازه‌ها، در طول دو دهه گذشته تحقیقات مفصلی در خصوص روش‌های مودی و سیگنالی که در زمره روش‌های ارتعاش - پایه هستند، صورت گرفته است [Doebing et al., 1996, Sohn et al., 2003].

بر مبنای تکنیک‌های پردازش سیگنال مختلف، روش‌های سیگنالی به سه دسته روش‌های حوزه زمان، روش‌های حوزه فرکانس و روش‌های حوزه زمان-فرکانس تقسیم‌بندی می‌شوند.

استفاده از تابع‌های زمان-فرکانس از جمله تکنیک‌های بسیار مهم و قابل توجه در روش‌های زمان-فرکانس هستند [Bradford, 2006]. با توجه به قابلیت‌های تابع زمان-فرکانس تحقیقات متعددی با استفاده از این توابع انجام شده است.

بوناتو و همکاران [Bonato et al., 1998, Bonato et al., 2000]، دیاستفانو و همکاران [De Stefano, Ceravolo, 2001]، ملهم و کیم [Melhem and Kim, 2003]

در سال ۲۰۰۳ ژانگ و همکاران [Zhang et al., 2003]، زو و چن [Zou and Chen, 2004]، بردفورد [Bradford, 2006]، یان و همکاران [Yan et al., 2007]، میشل و گوگن [Mi-Bagheri et], [chel and Gueguen, 2010]، باقری و همکاران [Bagheri et al., 2011]، کیاو و همکاران [Qiao, Esmaeily and Melhem, 2012]، کیم و همکاران [Kim et al., 2012] و ژانگ و اوایدیجی [Zhong and Oyadiji, 2013] برخی از محققین هستند که از توابع مختلف زمان-فرکانس استفاده کرده‌اند.

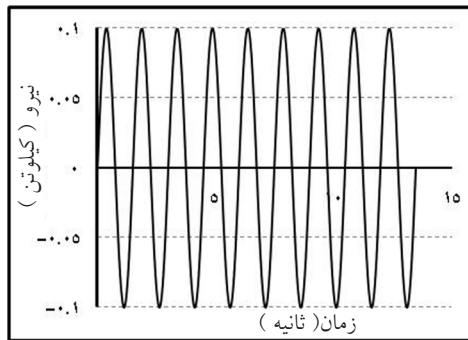
روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری به ترتیب در مراجع [Daneshjoo, Ahmadi and Mobtaker, 2011] و [Ahmadi and Daneshjoo, 2010] معرفی شده‌اند. در این تحقیق عملکرد روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری در شناسایی آسیب در پایه‌های بتنی پل‌های ساده با سیستم عرشه یک عنصری به صورت جامع مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن در تحقیقات پیشین انجام شده توسط نویسندگان، پاسخ پل‌ها به صورت سیگنال‌های شتاب ثبت شده است. حال آنکه لازم است بین سیگنال‌های مختلفی که می‌توانند ارتعاش پایه‌ها را ثبت نمایند، بررسی انجام و سیگنال بهینه برای کاربرد در روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری شناسایی شود. به این منظور ارتعاشات پایه‌ها به صورتهای جابجایی، سرعت و شتاب ثبت شده است.

بنابراین، در این تحقیق حساسیت روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری به نوع سیگنال ثبت شده مورد بررسی قرار گرفته است. موضوع دیگری که در این تحقیق به آن پرداخته شده، حساسیت روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری نسبت به فاصله حسگر تا محل آسیب‌دیده است.

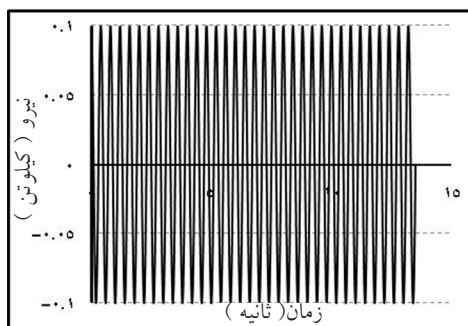
۲. روش تحقیق

جهت انجام ارزیابی جامع از مدل‌های تحلیلی پل‌های ۱۸۰W و

به پایه‌های پل اعمال شده و پاسخ پل ثبت می‌گردد. با این حال نیازی به اندازه‌گیری نیروی محرک نیست. پس از آن، پاسخ‌های پل با تابع زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش یافته پردازش می‌شوند و پلانها و ماتریسهای زمان-فرکانس محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و یا روش تانسوری، آسیب شناسایی و محل آن مشخص می‌شود. در این پژوهش از دو بار محرک سینوسی و کسینوسی برای ارتعاش پل استفاده شده است. بار سینوسی دارای فرکانس زاویه‌ای $\pi^4/3$ بوده و بار کسینوسی با فرکانس زاویه‌ای $\pi 5$ تعریف شده است. در انتخاب نیروهای محرک دو موضوع مد نظر قرار گرفته است. اول اینکه فرکانس زاویه‌ای نیروها با پریود ارتعاشات سازه‌ها متفاوت باشد. امکان‌پذیری تأمین و ایجاد نیروها و اعمال آنها به پلها، موضوع دیگری است که مورد نظر واقع شده است. مدت زمان بارهای محرک $13/5$ ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل بار محرک سینوسی و کسینوسی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده هستند.

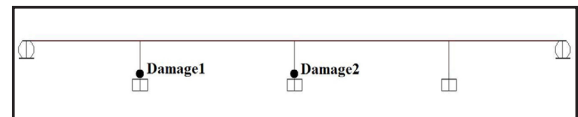


شکل ۳. بار محرک سینوسی با فرکانس زاویه‌ای $\pi^4/3$

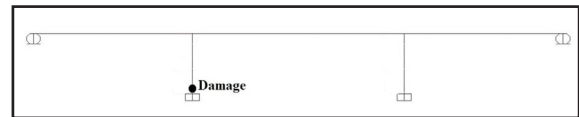


شکل ۴. بار محرک کسینوسی با فرکانس زاویه‌ای $\pi 5$

MGR استفاده شده است. دو الگوی آسیب برای پل $180W$ و یک الگوی آسیب برای پل MGR در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل ۱ در مدل پل $180W$ ، الگوی اول به صورت ایجاد آسیب در پایین پایه اول (پایه سمت چپ) و الگوی دوم به صورت آسیب در پایه دوم (پایه میانی) در نظر گرفته شده است. در مدل پل MGR نیز آسیب در پایین پایه دوم (پایه سمت چپ) در نظر گرفته شده که البته این الگو در شکل ۲ نشان داده شده است. آسیب به صورت کاهش سختی به اندازه 30% معادل‌سازی شده و با کاهش ممان اینرسی مقطع مدل‌سازی شده است. [Sakellariou and Fassois, 2006, Zonta et al., 2008, Limongelli, 2011, Lo Iacono, Navarra and Pirrotta, 2012].



شکل ۱. الگوهای آسیب در نظر گرفته شده در پل $180W$



شکل ۲. الگوی آسیب در نظر گرفته شده در پل MGR

فرض پایه‌ای در این تحقیق بر این اساس است که در اثر ایجاد آسیب در پایه پل، در پاسخ‌های دینامیکی نواحی اطراف محل آسیب اختلال به وجود می‌آید. معمولاً این اختلالات را نمی‌توان از سیگنال‌های ثبت شده تعیین کرد، اما هنگامی که سیگنال‌ها با توابع زمان-فرکانس پردازش شوند، این اختلالات شناسایی می‌شوند. در این تحقیق، الگوریتم جدید نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس برای شناسایی آسیب لرزه در پایه‌های پلها استفاده شده است. بر اساس الگوریتم پیشنهادی پیش از رویداد زلزله، یک نیروی محرک به میانه پایه‌های پل اعمال و پاسخ پل در پایه‌ها ثبت می‌شود. علاوه بر آن بعد از رویداد زلزله، نیروی محرک مجدداً

گرفته و معرفی شده است. در ادامه پل MGR معرفی می‌گردد.

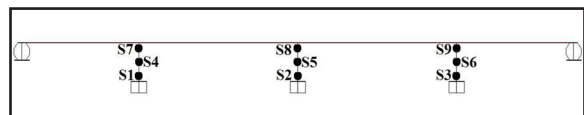
۳-۱ پل MGR

پل MGR دارای دو پایه و سه دهانه است. این پل بتنی بر اساس آیین‌نامه کلترنز [Caltrans, 2004] طراحی شده است. مقطع پایه‌ها دایره‌ای شکل و به قطر ۱/۸۳ متر است. پایه‌های بتنی با ۴۰ آرماتور طولی به قطر ۳۵/۸ میلیمتر و خاموت به قطر ۱۲/۷ میلیمتر به فواصل ۱۵ سانتیمتر مسلح شده‌اند. مقاومت فشاری بتن ۳۵ کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع بوده و تنش تسلیم و تنش نهایی فولاد به ترتیب ۴۷۸ و ۷۱۷ کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نما و ابعاد پل MGR نشان داده شده است. مدل این پل دارای ۳۶ گره و ۴۵ المان قاب است.

۴. تابع زمان-فرکانس مربعی بکار گرفته شده

در سال‌های اخیر پردازش سیگنال‌ها به صورت توآمان در حوزه زمان و در حوزه فرکانس، به عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل انواع سیگنال‌ها، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. به ویژه برای پردازش سیگنال‌های غیرمانا که محتوای فرکانسی با زمان تغییر می‌کند، این روش بسیار مؤثر است. اگرچه با تحلیل این سیگنال‌ها با استفاده از روش‌هایی در حوزه زمان و یا روش‌های در حوزه فرکانس، اطلاعاتی در خصوص سیگنال به دست می‌آید، لیکن هیچیک از این روش‌ها نمی‌توانند طیف فرکانسی را در یک زمان مشخص و یا زمانی که محتوای فرکانسی خاصی محقق می‌شود، بیان کنند. با نداشتن یک تابع یک بعدی در حوزه زمان (یا در حوزه فرکانس) به تابع دو بعدی در حوزه زمان و فرکانس، مشخصه‌های سیگنال در هر دو حوزه قابل بررسی هستند [Ahmadi and Daneshjoo, 2012a]. با استفاده از توابع زمان-فرکانس (Time-Frequency Representation; TFR) این امکان فراهم می‌آید که انرژی سیگنال در حوزه زمان و در

سیگنال‌های پاسخ پل در محل پایه‌ها به صورت سیگنال‌های جابجایی، سرعت و شتاب ثبت می‌شوند. ثبت این سیگنال‌ها در سه نقطه پایین، وسط و بالای هر پایه انجام می‌پذیرد. به عبارت دیگر فرض می‌شود در نقاط پایین، وسط و بالای هر پایه، حسگر نصب شده و ارتعاشات پل را ثبت می‌کنند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، حسگرهای مورد نظر جابجایی سنج، سرعت سنج و شتاب سنج هستند. محل نصب حسگرهای پل ۱۸۰W و پل MGR به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. بدیهی است با کاربرد الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس، حسگری دارای عملکرد مطلوب‌تری است که با درصد خطای کمتر، بتوان محل آسیب را تشخیص داد.



شکل ۵. محل‌های ثبت پاسخ پل ۱۸۰W



شکل ۶. محل‌های ثبت پاسخ پل MGR

۳. معرفی مدل‌های تحلیلی

پل ۱۸۰W و پل MGR بتنی با پایه‌های با مقطع دایره هستند. مدل‌های تحلیلی این پل‌ها توسط محققین دانشگاه برکلی کالیفرنیا و دانشگاه مرکزی فلوریدا تهیه شده و توسط مرکز تحقیقاتی PEER در سال ۲۰۰۸ در قالب گزارشی [Aviram, Mack-] [ie and Stojadinovic, 2008] منتشر شده است. با توجه به گزارش پیش‌گفته در مدل‌سازی پل ۱۸۰W و پل MGR نهایت دقت به عمل آمده و نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی آن به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. پل ۱۸۰W در مرجع [Ahmadi and Daneshjoo, 2010] مورد استفاده قرار

چنان که تبدیل فوری معکوس تابع خودهمبستگی لحظه‌ای با متغیر t محاسبه شود، تابع ابهام (ambiguity function) به صورت زیر محاسبه می‌گردد [Mertin, 1999]:

$$H_x(\theta, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int R_x(t, \tau) e^{i\theta t} dt \quad (2)$$

که در رابطه بالا θ و τ به ترتیب تأخیر زمانی و تأخیر فرکانسی هستند. توزیع ویگنر-ویل از تابع خودهمبستگی لحظه‌ای و با تابع ابهام قابل تعریف است.

توزیع ویگنر-ویل سیگنال تحلیلی $x(t)$ به صورت تبدیل فوری $R_x(t, \tau)$ با متغیر τ تعریف می‌گردد:

$$WVD_x(t, \omega) = \int R_x(t, \tau) e^{-i\omega \tau} d\tau \quad (3)$$

از سوی دیگر توزیع ویگنر-ویل و تابع ابهام به صورت زیر دارای رابطه مستقیم هستند:

$$WVD_x(t, \omega) = \iint H_x(\theta, \tau) e^{-i(\theta t + \omega \tau)} d\theta d\tau \quad (4)$$

چنان که $X(\omega)$ تبدیل فوری $x(t)$ باشد، تابع خودهمبستگی طیفی لحظه‌ای $(R_x(\omega, \theta))$ به صورت زیر است:

$$R_X(\omega, \theta) = X(\omega + \theta/2) X^*(\omega - \theta/2) \quad (5)$$

بنابراین:

$$R_X(\omega, \theta) = \iint R_x(t, \tau) e^{-i(\omega t + \theta \tau)} dt d\tau \quad (6)$$

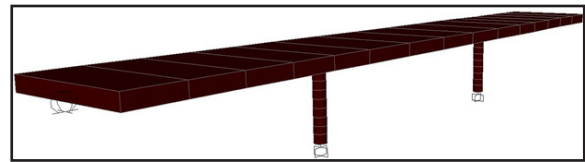
$$WVD_X(\omega, t) = \int R_X(\omega, \theta) e^{-i\theta t} d\theta = 2\pi WVD_x(-t, \omega) \quad (7)$$

$$H_X(\tau, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int R_X(\omega, \theta) e^{i\omega \tau} d\omega = 2\pi H_x(\tau, -\theta) \quad (8)$$

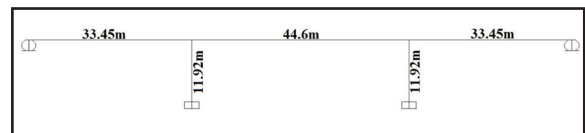
توزیع ویگنر-ویل دارای ویژگی‌های مطلوب قابل توجهی است [Mousa and Saleem, 2011] به طوری که در اوایل دهه ۸۰ میلادی پیرامون ویژگی‌ها و کاربردهای توزیع ویگنر-ویل مقالات متعددی انتشار یافت [Jeong and Williams, 1992].

تبلور جملات تداخلی موجب می‌شود که بعضی اوقات جملات منفی نیز ایجاد گردد. تابع $x(t)$ دو بار و به صورتهای x و x^* در انتگرال ظاهر می‌شوند که توزیع دو خطی یا درجه دوم را ممکن می‌سازند. در توزیع ویگنر-ویل تداخل ترم عرضی از ترم مربعی $x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2)$ و هنگامی که مؤلفه‌های سیگنالی متعددی

حوزه فرکانس به صورت همزمان قابل رویت باشد. توابع زمان-فرکانس به سه دسته توابع خطی، مربعی و غیرخطی دسته‌بندی می‌شوند [Hlawatsch and Auger, 2008].



شکل ۷. مدل تحلیلی پل MGR



شکل ۸. ابعاد مدل پل MGR

مهم‌ترین نقطه ضعف توابع زمان-فرکانس خطی رابطه اجتناب‌ناپذیر بین تفکیک‌پذیری زمانی و طیفی است [Lim and Oppenheim, 1988]. با این وجود و به منظور فائق آمدن بر این نقطه ضعف، توزیع ویگنر-ویل برای پردازش سیگنال‌ها در حوزه زمان و حوزه فرکانس بکار گرفته شد. توزیع ویگنر توسط ویگنر در سال ۱۹۳۲ در مکانیک کوانتوم پیشنهاد شد. ویل در سال ۱۹۴۸ از توزیع مورد نظر برای پردازش سیگنال استفاده کرد [Ville, 1948]. توزیع ویگنر-ویل تفکیک‌پذیری بسیار بالایی را در حوزه زمان و فرکانس ارائه می‌کند [Hammond and White, 1996]. توزیع ویگنر-ویل (Wigner-Ville Distribution; WVD) پایه‌ای‌ترین تابع در توابع زمان-فرکانس مربعی محسوب می‌شود [Guo, Durand and Lee, 1994]. توابع زمان-فرکانس مربعی دیگر را می‌توان از WVD با انتخاب مناسب فاکتورهای هموارسازی به دست آورد [Ahmadi and Daneshjoo, 2012b]. تابع خودهمبستگی لحظه‌ای سیگنال تحلیلی $x(t)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [Li, Zhao and Jia, 2010]:

$$R_x(t, \tau) = x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) \quad (1)$$

که * نشان‌دهنده مزدوج مختلط و τ بیانگر تأخیر زمانی هستند.

Daneshjoo,](Matrix Subtraction Method; MMSM Tensor) [Ahmadi and Mobtaker, 2011] و روش تانسوری (TM Method) [Ahmadi and Daneshjoo, 2010] که قبلا توسط نویسندگان پیشنهاد شده، به صورت اجمالی بازگو می‌شوند. این روشها بر مبنای تابع زمان-فرکانس مربعی توزیع تداخلی کاهش یافته پیشنهاد شده‌اند. بر اساس این روشها لازمست سیگنال‌های پاسخ ثبت شده در پایه‌ها پیش از ایجاد آسیب و پس از ایجاد آسیب با تابع توزیع تداخلی کاهش یافته پردازش شده و ماتریس پلان زمان-فرکانس TF_D و TF_S محاسبه شوند. این ماتریس‌ها به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ هستند:

(۱۲)

$$F_S = \begin{bmatrix} RID_S(t_1, f_1) & RID_S(t_1, f_2) & \cdots & RID_S(t_1, f_n) \\ RID_S(t_2, f_1) & RID_S(t_2, f_2) & \cdots & RID_S(t_2, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RID_S(t_m, f_1) & RID_S(t_m, f_2) & \cdots & RID_S(t_m, f_n) \end{bmatrix}$$

(۱۳)

$$F_D = \begin{bmatrix} RID_D(t_1, f_1) & RID_D(t_1, f_2) & \cdots & RID_D(t_1, f_n) \\ RID_D(t_2, f_1) & RID_D(t_2, f_2) & \cdots & RID_D(t_2, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RID_D(t_m, f_1) & RID_D(t_m, f_2) & \cdots & RID_D(t_m, f_n) \end{bmatrix}$$

در این روابط m تعداد مخازن فرکانسی در نظر گرفته شده و n تعداد گامهای زمانی هستند. در این پژوهش بر اساس تحلیلهای تاریخچه زمانی انجام شده و بار محرک سینوسی اعمال شده، طول گامهای زمانی ثبت سیگنال‌های پاسخ، ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین تعداد ستونهای ماتریسهای زمان-فرکانس برابر با مدت زمان آغاز اعمال نیروی محرک تا اتمام ارتعاشات پل، تقسیم بر ۰/۰۱ است. علاوه بر آن جهت افزایش تفکیک‌پذیری پلانهای زمان-فرکانس و افزایش دقت در تشخیص آسیب تعداد سطرهای ماتریسهای زمان-فرکانس نیز برابر با تعداد ستونها در نظر گرفته شده است. با این وجود ابعاد ماتریسهای زمان-فرکانس

در سیگنال وجود دارد، تداخل نوسانی زیادی تولید می‌شود. شایان ذکر است با وجود اینکه تولید جملات تداخلی به عنوان نقطه ضعف توابع زمان-فرکانس معرفی می‌گردد و در واقع موجب نمایش نادرست توزیع انرژی سیگنال در حوزه زمان و فرکانس می‌شود، در رادار و سونار دارای کاربرد است [Cohen, 2010]. توزیع تداخلی کاهش یافته (RID) نسبت به توزیع ویگنر-ویل دارای قابلیت‌های ویژه‌ای است. توزیع RID و توزیع WVD هر دو در کلاس کوهن قرار دارند [Cohen, 1989]. اما روش‌های تداخلی کاهش یافته برای سیگنالهای گذرا و غیرمانا مناسب تر هستند، چرا که تداخل مربعی که بیان توزیع WVD را پیچیده می‌کند در توزیع RID کاهش می‌یابد [Zheng et al., 1990]. توزیع تداخلی کاهش یافته ($RID(t, \omega)$) با هسته $R_X(t, \tau)$ برای سیگنال تحلیلی $x(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [Jeong and Williams, 1992]:

$$RID(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) R_X(t, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (9)$$

$$R_X(t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(v)}{|v|} (1 + \cos \frac{2\pi}{\tau} x)(t+v-\frac{\tau}{2}) x^*(t+v-\frac{\tau}{2}) dv \quad (10)$$

در این فرمولاسیون، $h(\tau)$ پنجره زمان-هموار کننده و $g(v)$ پنجره فرکانس هموار کننده است. در این تحقیق مطابق با مرجع [Bradford, 2006] از پنجره Hanning برای تخمین طیفی در توابع زمان-فرکانس استفاده شده است. رابطه پنجره Hanning به صورت زیر است.

$$w(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) & n=0,1,\dots,N-1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه بالا N نشان‌دهنده طول پنجره است که برابر با تعداد نقاط پنجره است.

۵. روش‌های تشخیص آسیب

در این تحقیق روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده (Modified)

شناسایی حسگر مطلوب برای تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پلها با استفاده از...

در ادامه، نتیجه‌های به دست آمده از محاسبات انجام شده برای هر یک از پلها و با توجه به الگوهای آسیب ارائه شده است. شایان ذکر است برای انجام محاسبات، نویسندگان برنامه DDCPB (Damage Detection of Concrete Piers of Bridges) را در فضای نرم‌افزار متلب [MatLab,2007] تدوین کرده‌اند. برنامه DDCPB بر حسب سیگنال‌های ثبت شده در ترازهای مختلف پایه‌ها، سیگنال‌ها را پردازش کرده و پس از محاسبه ماتریسهای زمان-فرکانس، پایه آسیب‌دیده را با روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و یا روش تانسوری شناسایی می‌کند.

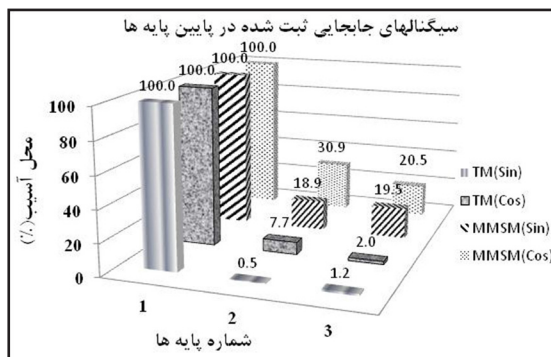
۶-۱ پردازش سیگنال‌های پاسخ پل ۱۸۰W و تشخیص آسیب همان‌طور که بیان گردید دو الگوی آسیب برای مدل پل ۱۸۰W در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن دو بار محرک به مدل اعمال شده و پلانها و ماتریس‌های زمان-فرکانس حاصل با دو روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری، جهت تشخیص آسیب به کار برده شده‌اند. در ادامه نتایج به دست آمده نشان داده شده است.

۶-۱-۱ الگوی اول آسیب

بر اساس این الگو، آسیب در پایین پایه اول (پایه سمت چپ) ایجاد شده است.

حسگر جابجایی سنج

نتایج محاسبات انجام شده با الگوریتم پیشنهادی و روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری و استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در شکلهای ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۹. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در پایین پایه‌ها

در این تحقیق برابر با $1500 * 1500$ هستند.

$$\Delta(i, j) = \left| \mathbf{F} s(t_i, f_j) - \mathbf{F} D(t_i, f_j) \right| \quad (14)$$

در ماتریس Δ هر درایه نشان‌دهنده اختلاف بین ماتریس‌های پلان زمان-فرکانس است. تغییر کلی به وجود آمده در گامهای زمانی و مخازن فرکانسی مختلف را می‌توان با جمع درایه‌های ماتریس Δ تخمین زد.

$$Difference = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\Delta(i, j)| \quad (15)$$

نویسندگان پس از ارائه روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، روش تانسوری را پیشنهاد کردند. اصول روش تانسوری با روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده مشابه است. بر اساس این روش مشابه با روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، ماتریس Δ محاسبه می‌شود. سپس تانسور Θ مطابق با رابطه ۱۶ به دست می‌آید.

$$\Theta(i, j, k) = \begin{pmatrix} \Delta_k(t_1, f_1) & \Delta_k(t_1, f_2) & \dots & \Delta_k(t_1, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_2(t_1, f_1) & \Delta_2(t_1, f_2) & \dots & \Delta_2(t_1, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t_1, f_1) & \Delta_1(t_1, f_2) & \dots & \Delta_1(t_1, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t_2, f_1) & \Delta_1(t_2, f_2) & \dots & \Delta_1(t_2, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t_m, f_1) & \Delta_1(t_m, f_2) & \dots & \Delta_1(t_m, f_n) \end{pmatrix} \quad (16)$$

با توجه به این موضوع که پس از ایجاد آسیب، سیگنال‌های پاسخ پل تغییر کرده و این تغییر در نقاط نزدیک آسیب، حداکثر هستند، بنابراین در هر زمان-فرکانس بایستی مقدار $\Delta(i, j)$ مربوط به نقطه مجاور به محل آسیب دیده در مقایسه با ماتریسهای Δ مربوط به سایر نقاط، بیشتر باشد. با این وجود در هر زمان-فرکانس، درایه‌های ماتریس Θ در بعد k با یکدیگر مقایسه شده و عدد بزرگ‌تر بدون تغییر باقی مانده، اما سایر درایه‌ها برابر صفر قرار داده می‌شوند. در نهایت برابر با رابطه ۱۷ عدد $Difference(k)$ محاسبه می‌گردد که عدد بزرگ‌تر نشان دهنده محل آسیب است.

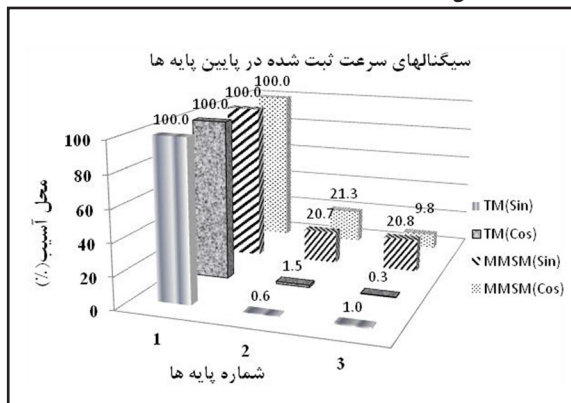
$$Difference(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\Theta(i, j, k)| \quad (17)$$

۶. تحلیل و محاسبات

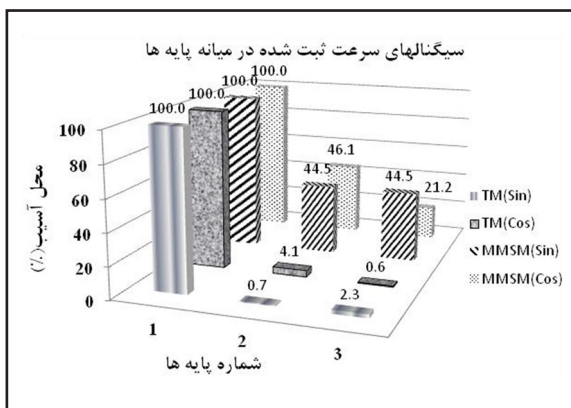
۵۱/۶٪ محاسبه شده است. نتایج به دست آمده به خوبی مؤید این موضوع است که با کاربرد روش تانسوری، دقت در تشخیص آسیب به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

حسگر سرعت سنج

نتایج به دست آمده با استفاده از سیگنال‌های سرعت ثبت شده و کاربرد الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ قابل مشاهده هستند.

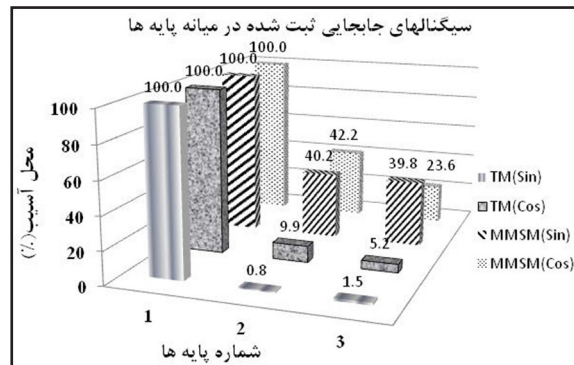


شکل ۱۲. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایین پایه‌ها

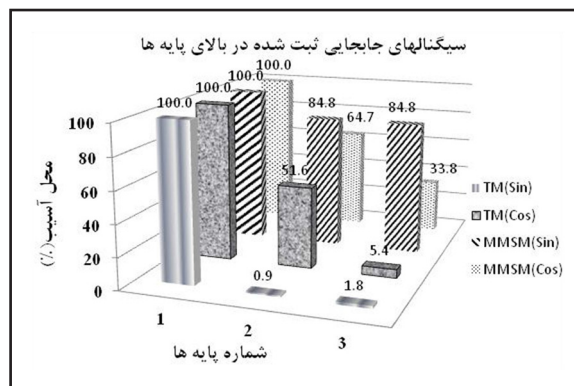


شکل ۱۳. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های سرعت ثبت شده در میانه پایه‌ها

بر اساس نتایج به دست آمده، هنگامی که از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایین و میانه پایه‌ها استفاده شده، محل آسیب به درستی شناسایی شده است. اما همان طور که در کردار شکل ۱۴ نشان داده شده است، در صورت استفاده از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در بالای پایه‌ها تحت اثر محرک کسینوسی، پایه



شکل ۱۰. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در میانه پایه‌ها



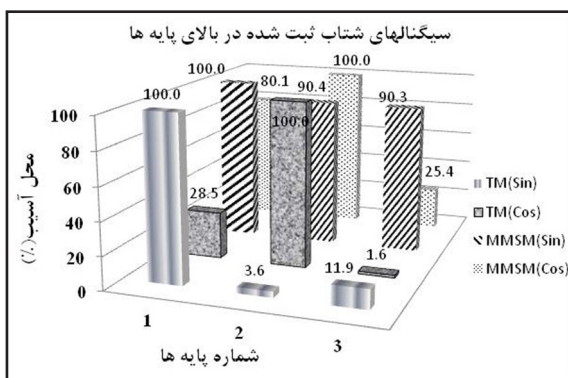
شکل ۱۱. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در بالای پایه‌ها

همان طور که در شکل‌ها دیده می‌شود با استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در پایین، میانه و بالای ستونها و با استفاده از الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری، پایه آسیب دیده به درستی شناسایی شده است. بیشترین مقدار خطا در صورت استفاده از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده در پایین پایه‌ها برابر با ۳۰/۹٪، در صورت استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در میانه ستونها ۲/۴۲٪ و با استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در بالای ستونها ۸/۸۴٪ به دست آمده است. در صورت استفاده از روش تانسوری در صورت کاربرد سیگنال‌های ثبت شده در پایین پایه‌ها بیشینه خطا ۷/۷٪، در صورت کاربرد سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در میانه پایه‌ها بیشینه خطا ۹/۹٪ و با استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در بالای پایه‌ها بیشینه خطا

شناسایی حسگر مطلوب برای تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پلها با استفاده از...



شکل ۱۶. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های شتاب ثبت شده در میانه پایه‌ها



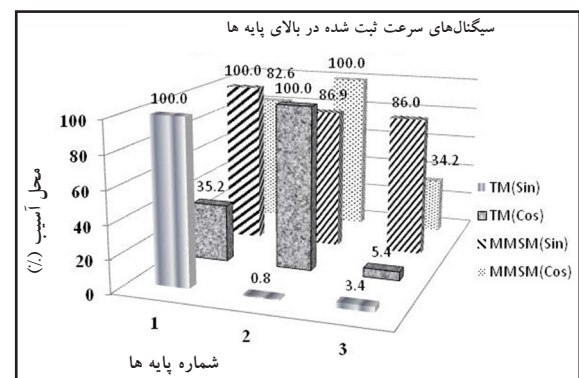
شکل ۱۷. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های شتاب ثبت شده در بالای پایه‌ها

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، پایه شماره ۱ به درستی به عنوان پایه آسیب‌دیده گزارش شده است. بیشینه خطا در تعیین محل آسیب در صورت استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در پایین پایه‌ها با کاربرد روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری به ترتیب برابر با $26/3\%$ و $2/5\%$ و با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در میانه پایه‌ها در روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده معادل با $53/7\%$ و در روش تانسوری برابر با $6/7\%$ محاسبه شده است. مطابق با شکل ۱۷ با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در بالای پایه‌ها تحت اثر بار کسینوسی، محل آسیب به اشتباه گزارش شده است.

۲-۱-۶ الگوی دوم آسیب

بر اساس این الگو، آسیب در پایین پایه دوم (پایه میانی) ایجاد شده است.

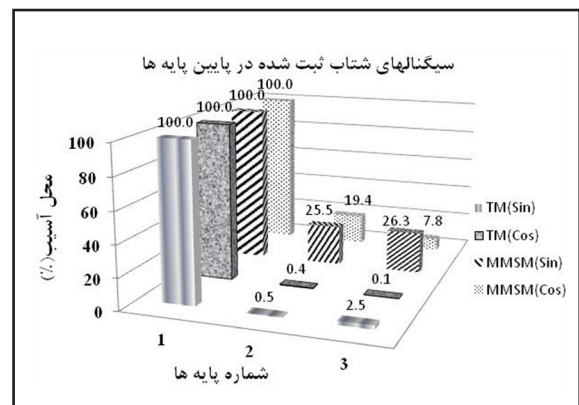
آسیب‌دیده به اشتباه پایه ۲ گزارش شده است. همان طوری که در شکل‌ها نشان داده شده، در صورت استفاده از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده بیشترین مقدار خطا با کاربرد سیگنال‌های ثبت شده در پایین پایه‌ها و میانه پایه‌ها به ترتیب برابر با $21/3\%$ و $46/1\%$ است. با کاربرد روش تانسوری نیز بیشینه خطا در صورت استفاده از سیگنال‌های ثبت شده در پایین پایه‌ها به میزان $1/5\%$ و میانه پایه‌ها برابر با $4/1\%$ به دست آمده است.



شکل ۱۴. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های سرعت ثبت شده در بالای پایه‌ها

حسگر شتاب سنج

نتیجه‌های به دست آمده از کاربرد الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۵. تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های شتاب ثبت شده در پایین پایه‌ها

حسگر جابجایی سنج

در صورت استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در میانه ستونها ۳۶/۸٪ و با استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در بالای ستونها ۸۵/۳٪ به دست آمده است. در صورتی که روش تانسوری بکار گرفته شود، با کاربرد سیگنال‌های ثبت شده در پایین، میانه و بالای پایه‌ها بیشترین مقدار خطا به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۷ و ۱/۶ محاسبه شده است.

حسگر سرعت سنج

نتایج به دست آمده با استفاده از سیگنال‌های سرعت ثبت شده و کاربرد الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری در جدول ۲ قابل مشاهده هستند.

نتایج محاسبات انجام شده با الگوریتم پیشنهاد شده و روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری و استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۱ قابل ملاحظه است با استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در پایین، میانه و بالای ستونها و با استفاده از الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده یا روش تانسوری، پایه آسیب‌دیده به درستی شناسایی شده است. چنان که از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده استفاده شود، بیشترین مقدار خطا در صورت استفاده از سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در پایین پایه‌ها برابر با ۱۸/۳٪،

جدول ۱. مقادیر حاصل از کاربرد روشهای تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های جابجایی ثبت شده در پایه‌های پل ۱۸۰W

| ردیف | روش تشخیص آسیب | محل ثبت سیگنال پاسخ | نیروی محرک | مقدار Difference در هر یک از پایه‌ها | | |
|------|--------------------------------|------------------------|-------------|--------------------------------------|--------|--------|
| | | | | پایه ۱ | پایه ۲ | پایه ۳ |
| ۱ | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۱۷/۴ | ۱۰۰/۰ | ۱۷/۴ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۸/۳ | ۱۰۰/۰ | ۱۸/۳ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۳۶/۸ | ۱۰۰/۰ | ۳۶/۸ |
| | | | بار کسینوسی | ۲۱/۹ | ۱۰۰/۰ | ۲۱/۹ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۸۵/۳ | ۱۰۰/۰ | ۸۵/۳ |
| | | | بار کسینوسی | ۲۸/۶ | ۱۰۰/۰ | ۲۸/۶ |
| ۲ | روش تانسوری | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۰/۴ | ۱۰۰/۰ | ۰/۴ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۳ | ۱۰۰/۰ | ۰/۳ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۰/۴ | ۱۰۰/۰ | ۰/۴ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۷ | ۱۰۰/۰ | ۰/۶ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۱/۲ | ۱۰۰/۰ | ۰/۹ |
| | | | بار کسینوسی | ۱/۶ | ۱۰۰/۰ | ۱/۴ |

شناسایی حسگر مطلوب برای تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پلها با استفاده از...

بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۳، پایه شماره ۲ به درستی به عنوان پایه آسیب‌دیده گزارش شده است. بیشینه خطا در تعیین محل آسیب در صورت استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در پایین پایه‌ها برابر با $22/6\%$ و با کاربرد سیگنال‌های شتاب ثبت شده در میانه پایه‌ها معادل با $48/1\%$ و با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در بالای پایه‌ها برابر با $88/5\%$ محاسبه شده است.

۴-۶ پردازش سیگنال‌های پاسخ پل MGR و تشخیص آسیب با توجه به تعداد پایه‌های پل MGR یک الگوی آسیب برای مدل پل مذکور در نظر گرفته شده است. مشابه با حالت قبل دو بار محرک به مدل اعمال شده و سیگنال‌های پاسخ پایه‌ها در سه

بر اساس نتایج به دست آمده با استفاده از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایین، میانه و بالای پایه‌ها، محل آسیب به درستی شناسایی شده است. بیشینه خطا هنگامی که از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایین پایه‌ها استفاده شده برابر با $18/6\%$ ، زمانی که از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در میانه پایه‌ها استفاده شده، معادل با $41/1\%$ و هنگامی که از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در بالای پایه‌ها استفاده شده برابر با $86/3\%$ محاسبه شده است.

حسگر شتاب سنج

نتیجه‌های به دست آمده از کاربرد الگوریتم پیشنهاد شده و روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲. مقادیر حاصل از کاربرد روشهای تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایه‌های پل ۱۸۰W

| ردیف | روش تشخیص آسیب | محل ثبت سیگنال پاسخ | نیروی محرک | مقدار Diffrence در هر یک از پایه‌ها | | |
|------|-----------------------------|---------------------|-------------|-------------------------------------|--------|--------|
| | | | | پایه ۱ | پایه ۲ | پایه ۳ |
| ۱ | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۱۸/۶ | ۱۰۰/۰ | ۱۸/۶ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۰/۶ | ۱۰۰/۰ | ۱۰/۶ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۴۱/۱ | ۱۰۰/۰ | ۴۱/۱ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۸/۰ | ۱۰۰/۰ | ۱۸/۰ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۸۶/۳ | ۱۰۰/۰ | ۸۶/۳ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۶/۰ | ۱۰۰/۰ | ۱۶/۰ |
| ۲ | روش تانسوری | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۱/۲ | ۱۰۰/۰ | ۱/۲ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۱ | ۱۰۰/۰ | ۰/۱ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۱/۷ | ۱۰۰/۰ | ۱/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۳ | ۱۰۰/۰ | ۰/۱ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۷/۵ | ۱۰۰/۰ | ۷/۵ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۸ | ۱۰۰/۰ | ۰/۸ |

داده شده است.

همان طور که از نتایج نشان داده شده در جدول ۴ به دست می‌آید، با استفاده از سیگنال‌های جایجایی ثبت شده در پایین، میانه و بالای ستونها و با استفاده از الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، پایه آسیب‌دیده به درستی شناسایی شده است. بیشینه خطا در تعیین محل آسیب در صورت استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در پایین پایه‌ها با کاربرد روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری به ترتیب برابر با $33/1\%$ و $7/8\%$ ، با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در میانه پایه‌ها در روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده معادل با $71/1\%$ و در روش تانسوری برابر

تراز پایین، میانه و بالای پایه‌ها ثبت شده‌اند. بر اساس الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس، سیگنال‌های پاسخ با تابع زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش یافته پردازش شده و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده است. حاصل با دو روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری مورد بررسی قرار گرفته و پایه آسیب‌دیده شناسایی شده است. در ادامه نتایج به دست آمده معرفی شده است.

حسگر جایجایی سنج

نتایج محاسبات انجام شده با الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری و استفاده از سیگنال‌های جایجایی ثبت شده در جدول ۴ نشان

جدول ۳. مقادیر حاصل از کاربرد روشهای تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های شتاب ثبت شده در پایه‌های پل ۱۸۰W

| ردیف | روش تشخیص آسیب | محل ثبت سیگنال پاسخ | نیروی محرک | مقدار Difference در هر یک از پایه‌ها | | |
|------|-----------------------------|---------------------|-------------|--------------------------------------|--------|--------|
| | | | | پایه ۱ | پایه ۲ | پایه ۳ |
| ۱ | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۲۲/۶ | ۱۰۰/۰ | ۲۲/۶ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۰/۲ | ۱۰۰/۰ | ۱۰/۲ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۴۸/۱ | ۱۰۰/۰ | ۴۸/۱ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۷/۷ | ۱۰۰/۰ | ۱۷/۷ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۸۸/۵ | ۱۰۰/۰ | ۸۸/۵ |
| | | | بار کسینوسی | ۲۴/۶ | ۱۰۰/۰ | ۲۴/۶ |
| ۲ | روش تانسوری | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۱/۶ | ۱۰۰/۰ | ۰/۹ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۰ | ۱۰۰/۰ | ۰/۰ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۴/۰ | ۱۰۰/۰ | ۲/۶ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۲ | ۱۰۰/۰ | ۰/۲ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۶/۱ | ۱۰۰/۰ | ۵/۹ |
| | | | بار کسینوسی | ۰/۵ | ۱۰۰/۰ | ۰/۷ |

شناسایی حسگر مطلوب برای تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پلها با استفاده از...

سرعت ثبت شده در بالای پایه‌ها تحت اثر بار محرک کسینوسی، پایه آسیب‌دیده به اشتباه پایه ۱ گزارش شده است. همان طور که در جدول ۵ نشان داده شده، در صورت استفاده از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده بیشترین مقدار خطا با کاربرد سیگنال‌های ثبت شده در پایین پایه‌ها و میانه پایه‌ها به ترتیب برابر با ۳۲/۶٪ و ۷۲/۵٪ است. با کاربرد روش تانسوری نیز پیشینه خطا در صورت استفاده از سیگنال‌های ثبت شده در پایین پایه‌ها به میزان ۳/۹٪ و میانه پایه‌ها برابر با ۲۳/۴٪ به دست آمده است.

حسگر شتاب‌سنج

در جدول ۶ نتیجه‌های به دست آمده با استفاده از الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح

با ۱۴/۲٪ و در صورت استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در بالای پایه‌ها با کاربرد روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری به ترتیب برابر با ۹۸/۰٪ و ۹۲/۳٪ محاسبه شده است.

حسگر سرعت‌سنج

نتایج به دست آمده با استفاده از سیگنال‌های سرعت ثبت شده و کاربرد الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس و روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری در جدول ۵ قابل مشاهده هستند.

بر اساس نتایج به دست آمده، هنگامی که از سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایین و میانه پایه‌ها استفاده شده، محل آسیب به درستی شناسایی شده است. اما در صورت استفاده از سیگنال‌های

جدول ۴. مقادیر حاصل از کاربرد روشهای تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های جایجایی ثبت شده در پایه‌های پل MGR

| ردیف | روش تشخیص آسیب | محل ثبت سیگنال پاسخ | نیروی محرک | مقدار Difference در هر یک از پایه‌ها | |
|------|-----------------------------|---------------------|-------------|--------------------------------------|--------|
| | | | | پایه ۱ | پایه ۲ |
| ۱ | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۳۳/۱ | ۱۰۰/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۲۸/۲ | ۱۰۰/۰ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۷۱/۱ | ۱۰۰/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۵۴/۵ | ۱۰۰/۰ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۹۸/۰ | ۱۰۰/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۷۰/۲ | ۱۰۰/۰ |
| ۲ | روش تانسوری | پایین پایه‌ها | بار سینوسی | ۰/۸ | ۱۰۰/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۷/۸ | ۱۰۰/۰ |
| | | میانه پایه‌ها | بار سینوسی | ۱/۳ | ۱۰۰/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۱۴/۲ | ۱۰۰/۰ |
| | | بالای پایه‌ها | بار سینوسی | ۹۲/۳ | ۱۰۰/۰ |
| | | | بار کسینوسی | ۶۰/۸ | ۱۰۰/۰ |

شناسایی آسیب در پایه‌های بتنی پلها دارای قابلیت‌های منحصر به فرد هستند. به منظور افزایش دقت این روشها در تشخیص آسیب در این پژوهش، حساسیت این روشها به سیگنال‌های پاسخ ثبت شده در پایه‌های بتنی پلهای ساده با سیستم عرشه یک عنصری مورد مطالعه قرار گرفته است. موضوع دیگری که در این تحقیق بررسی شده است حساسیت روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری نسبت به فاصله حسگر تا محل آسیب‌دیده است. به این منظور سه حسگر متفاوت جابجایی سنج، سرعت سنج و شتاب سنج مورد نظر قرار گرفته و به تبع آن سیگنال‌های پاسخ به سه صورت جابجایی، سرت و شتاب ثبت شده‌اند. علاوه بر آن به منظور بررسی حساسیت روش‌های تشخیص آسیب مورد

شده و تانسوری و کاربرد سیگنال‌های شتاب ثبت شده، نشان داده شده است. بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۶ پایه شماره ۲ به درستی به عنوان پایه آسیب‌دیده گزارش شده است. بیشینه خطا در تعیین محل آسیب در صورت استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در پایین پایه‌ها برابر با $33/9\%$ و با کاربرد سیگنال‌های شتاب ثبت شده در میانه پایه‌ها معادل با $73/5\%$ و با استفاده از سیگنال‌های شتاب ثبت شده در بالای پایه‌ها برابر با $98/5\%$ محاسبه شده است.

۷. نتیجه‌گیری

روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و روش تانسوری برای

جدول ۵. مقادیر حاصل از کاربرد روش‌های تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایه‌های پل MGR

| مقدار Difference در هر یک از پایه‌ها | نیروی محرک | محل ثبت سیگنال پاسخ | روش تشخیص آسیب | ردیف |
|--------------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|------|
| | | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | ۱ |
| ۳۲/۶ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۱۶/۹ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۷۲/۵ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تانسوری | ۲ |
| ۹۸/۲ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۹۹/۵ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۱/۳ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | ۱ |
| ۳/۹ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۴/۱ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۲۳/۴ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تانسوری | ۲ |
| ۹۶/۲ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۹۵/۶ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۱۰۰/۰ | بار کسینوسی | | | |

شناسایی حسگر مطلوب برای تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پلها با استفاده از...

حسگر جابجایی سنج به منظور استفاده در الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس در مقایسه با سیگنال‌های ثبت شده با سایر حسگرها، مطلوب‌تراند. در حالت الگوی آسیب اول در مدل پل ۱۸۰W چنان که تحت بار محرک کسینوسی از سیگنال‌های پاسخ ثبت شده توسط حسگرهای سرعت‌سنج و یا شتاب‌سنج که در بالای پایه‌ها نصب شده‌اند استفاده شود. در هر دو روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و تانسوری، محل آسیب به اشتباه در پایه ۲ نشان داده می‌شود. در صورت استفاده از حسگرهای سرعت‌سنج این موضوع با شرایط مشابه در تشخیص آسیب پل MGR نیز اتفاق افتاده و آسیب به اشتباه در پایه اول تشخیص داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در صورتی که در الگوریتم

نظر به فاصله محل ثبت پاسخ تا محل آسیب‌دیده، پاسخ پلها در سه محل پایین، میانه و بالای پایه‌ها اندازه‌گیری شده است. مدل‌های سازه‌های بکار گرفته شده شامل مدل پل ۱۸۰W و مدل پل MGR هستند. دو الگوی آسیب در پل ۱۸۰W و یک الگوی آسیب در پل MGR در نظر گرفته شده است. جهت انجام محاسبات، نویسندگان برنامه DDCPB را در فضای نرم‌افزار متلب تدوین کرده‌اند. در این پژوهش، ۵۴ مرتبه از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده و ۵۴ مرتبه از روش تانسوری استفاده شده است. در تمامی حالات، آسیب شناسایی شده، لیکن تنها ۶ مرتبه محل وجود آسیب به اشتباه گزارش شده است. از مطالعات انجام شده به دست می‌آید که سیگنال‌های ثبت شده با

جدول ۶. مقادیر حاصل از کاربرد روش‌های تشخیص آسیب بر اساس سیگنال‌های سرعت ثبت شده در پایه‌های پل MGR

| مقدار Difference در هر یک از پایه‌ها | نیروی محرک | محل ثبت سیگنال پاسخ | روش تشخیص آسیب | ردیف |
|--------------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|------|
| | | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | ۱ |
| ۳۳/۹ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۱۱/۴ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۷۳/۵ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تانسوری | ۲ |
| ۹۸/۲ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۹۸/۵ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۱/۵ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده | ۱ |
| ۰/۴ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۳/۷ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۸/۷ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | پایین پایه‌ها | روش تانسوری | ۲ |
| ۹۴/۹ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | میانه پایه‌ها | | |
| ۹۸/۳ | بار کسینوسی | | | |
| ۱۰۰/۰ | بار سینوسی | بالای پایه‌ها | | |
| ۹۸/۳ | بار کسینوسی | | | |

three-dimensional Tensor Method for seismic damage detection in concrete piers of bridges using response signals”, Journal of Transportation Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 115- 126.(in Persian)

-Ahmadi, H. R. and Daneshjoo, F. (2012a) “The assessment and comparison of three square time-frequency distributions including Born-Jordan, Margenau-Hill and Rihaczek for extraction of dynamic properties from seismic response signals of bridge concrete piers”, 2nd International Conference on Acoustics & Vibration, Tehran, Iran

-Ahmadi, H. R. and Daneshjoo, F. (2012b) “A harmonic vibration, output only and time-frequency representation based method for damage detection in concrete piers of complex bridges”, International Journal of Civil and Structural Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 987- 1002.

-American Association of State Highway and Transportation (1990) “Manual for maintenance inspection of bridges”, USA: Washington, D.C.

-Aviram, Ady, Mackie, Kevin R. and Stojadinovic, Božidar (2008) “Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California”, USA: Berkeley, PEER Report 2008/03.

-Bagheri, A., Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M. and

پیشنهادی از ارتعاشات ثبت شده توسط حسگر سرعت سنج استفاده شود، در حالت کلی نتایج ضعیف‌تری حاصل می‌شود. با توجه به محاسبات انجام شده، در صورت کاربرد سیگنال‌های پاسخ ثبت شده با حسگر جابجایی سنج در روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و یا تانسوری، در همه مواقع پایه آسیب‌دیده به درستی شناسایی شده است. با استفاده از سیگنال‌های ثبت شده با حسگر سرعت سنج، در ۸۸/۹٪ تشخیص آسیب با صحت انجام پذیرفته و هنگامی که از سیگنال‌های ثبت شده با حسگر شتاب سنج استفاده شده، پایه آسیب‌دیده با دقت ۹۴/۴٪ تشخیص داده شده است.

مطابق با محاسبات انجام شده با افزایش فاصله حسگرها از محل آسیب دیده، دقت روش‌های تفاضل ماتریسی اصلاح شده و یا تانسوری در تشخیص آسیب کاهش می‌یابد. در واقع چنان که هریک از حسگرهای جابجایی سنج، سرعت سنج و یا شتاب سنج در فاصله نه چندان دور از محل آسیب‌دیده نصب شده باشند، در صورت کاربرد الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس، آسیب شناسایی شده و محل آن به درستی و با دقت مطلوب مشخص می‌گردد. بر اساس نتایج به دست آمده، چنان که سیگنال‌های پاسخ ثبت شده در پایین پایه‌ها (با هر سه نوع حسگر جابجایی سنج، سرعت سنج و شتاب سنج) در الگوریتم نیروی محرک و تابع زمان-فرکانس مورد استفاده قرار گیرند، نتایج با دقت بالا حاصل می‌شوند. به عبارت دیگر مطابق با نتایج محاسبه شده، چنان که حسگر در نزدیکی محل آسیب نصب شده باشد، با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده، فارغ از نوع حسگر، آسیب، تشخیص داده شده و محل آن با خطای بسیار کم مشخص می‌شود.

۸ مراجع

-Ahmadi, H. R. and Daneshjoo, F. (2010) “A new

USA: California, California Department of Transportation.

-Cohen, L (1989) .“Time-frequency distributions-a review”, Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 7, pp. 941-981.

-Cohen, L (2010) .“Time–frequency approach to radar, sonar and seismic wave propagation with dispersion and attenuation”, IET Signal Processing, Vol. 4, No. 4, pp. 421-427.

-Daneshjoo, F., Ahmadi, H. R. and Mobtaker, G. (2011) “Feature identification and damage detection of concrete piers of bridges using time-frequency representation and modified matrix subtraction method”, accepted in Sharif Journal of Science and Technology.(in Persian)

-De Stefano, A., Ceravolo, R. and Sabia, D. (2001) “Output only dynamic identification in time-frequency domain”, USA: Arlington, Proceedings of the American Control Conference, pp. 447-449.

-Doebbling, Scott W., Farrar, Charles R., Prime, Michael B. and Shevitz, Daniel W. (1996) “Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A Literature Review”, USA: Los Ala-

Bakhshi, H. (2011) “Structural damage identification of plates based on modal data using 2D discrete wavelet transform”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 40, No. 1, pp. 13–28.

-Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A. and Molinari, F. (1998) “Time-frequency and cross-time-frequency based techniques for structural identification of systems”, USA: Pennsylvania, Proceedings of the IEEE International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis.

-Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A. and Molinari, F. (2000) “Use of cross-time-frequency estimators for structural identification in non-stationary conditions and under unknown excitation”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 237, No. 5, pp. 779-791.

-Bradford, Samuel Case (2006) “Time-frequency analysis of systems with changing dynamic properties”, USA: California Institute of Technology, PhD thesis.

-Brinckerhoff, Parsons (1992) “Bridge inspection and rehabilitation: a practical guide”, UK: John Wiley & Sons Ltd.

-Caltrans (2004) “Caltrans seismic design criteria”,

deviation of displacement mode shape data”, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 32, No. 1, pp. 14- 24.

-Kunwar, A., Jha, R., Whelan, M. and Janoyan, K. (2013) “Damage detection in an experimental bridge model using Hilbert–Huang transform of transient vibrations”, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 20, No. 1, pp. 1- 15.

-Li, M., Zhao, W. and Jia, W. (2010) “The profile of kernels in time frequency distributions”, Journal of Ship Mechanics, Vol. 3, No. 6, pp. 107-115.

-Lim, Jae S. and Oppenheim, Alan V. (1988) “Advanced topics in signal processing”, USA: Prentice-Hall.

-Limongelli, M. P. (2011) “The interpolation damage detection method for frames under seismic excitation”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, pp. 5474–5489.

-Lo Iacono, F., Navarra, G. and Pirrotta, A. (2012) “A damage identification procedure based on Hilbert transform: Experimental validation”, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 190, pp. 146–160.

-Matlab (The Language of Technical Computing) (2007) Version 7.6, The MathWorks, USA.

mos National Laboratory, LA-13070-MS.

-Guo, Z., Durand, L. G. and Lee, H. C. (1994) “Comparison of time-frequency distribution techniques for analysis of simulated doppler ultrasound signals of the femoral artery”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 41, No.4 , pp. 1866-1876.

-Hammond, J. K. and White, P. R. (1996) “The analysis of non-stationary signals using time-frequency methods”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 190, pp. 419–447.

-Hlawatsch, Franz and Auger, François (2008) “Time-frequency analysis”, UK: ISTE Ltd and John Wiley & Sons Ltd.

-Jeong, J. and Williams, W.J. (1992) “Kernel design for reduced interference distributions”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 40, No. 2, pp. 402-412.

-Kim, Y., Chong, J.W., Chon, K.H. and Kim, J.M. (2012) “Wavelet-based AR–SVM for health monitoring of smart structures”, Smart Materials and Structures, Vol. 22, doi:10.1088/0964-1726/22/1/015003.

-Kim, J.B., Lee, E.T., Rahmatalla, S., and Eun, H.C. (2013) “Non-baseline damage detection based on the

- Sakellariou, J. S. and Fassois, S. D. (2006) "Stochastic output error vibration-based damage detection and assessment in structures under earthquake excitation", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 297, pp. 1048–1067.
- Sohn, Hoon, Farrar, Charles R., Hemez, Francois M., Shunk, Devin D., Stinemates, Daniel W. and Nadler, Brett R. (2003) "A review of structural health monitoring literature", USA: Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS.
- Ville, J. (1948) "Theorie et applications de la notion de signal analytique", *Cables et Transmissions*, vol. 2.A, pp. 61-74. Translated from French by Selin, I. (1958), "Theory and applications of the notion of complex signal", USA: RAND Corporation.
- Yan, Y., Cheng, L., Wu, Z. and Yam, L. (2007) "Development in vibration-based structural damage detection technique", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.21, pp. 2198–2211.
- Zhang, Z., Hua, H., Xu, X. and Huang, Z. (2003) "Modal parameter identification through Gabor Expansion of response signals", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 266, pp. 943-955.
- Zheng, C., Tomow, A., Kushwaha, R., Sackellares,
- Melhem, H. and Kim, H. (2003) "Damage detection in concrete by Fourier and Wavelets analysis", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 5, pp. 571-577.
- Mertin, Alfred (1999) "Signal analysis (Wavelets, filter bank, time-frequency transforms and applications)", England: John Wiley & Sons Ltd.
- Michel, C. and Gueguen, P. (2010) "Time-frequency analysis of small frequency variations in civil engineering structures under weak and strong motions using a reassignment method", *Structural Health Monitoring*, Vol. 9, pp. 159–171.
- Mousa, A. and Saleem, R. (2011) "Using reduced interference distributions to analyze abnormal cardiac signal", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 62, No.3, pp.168-172.
- Parke, Gerard and Hewson, Nigel (2008) "ICE manual of bridge engineering", UK: Thomas Telford Ltd.
- Qiao, L., Esmaeily, A. and Melhem, H. G. (2012) "Signal pattern recognition for damage diagnosis in structures", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 27, No. 9, pp. 699-710.

J.C. and Williams, W. J. (1990) "Time–frequency analysis of EEG recordings with the reduced interference distribution", Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol. 12, No. 2, pp. 857-857.

-Zhong, S. and Oyadiji, S. O. (2013) "Sampling interval sensitivity analysis for crack detection by stationary wavelet transform", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 20, No. 1, pp. 45- 69.

-Zonta, D., Elgamal, A., Fraser, M. and Priestley, M.J.N. (2008) "Analysis of change in dynamic properties of a frame-resistant test building", Engineering Structures, Vol. 30, pp. 183–196.

-Zou, J. and Chen, J. (2004) "A comparative study on time-frequency feature of cracked rotor by Wigner-Ville Distribution and Wavelet Transform", Journal of Sound and Vibration, Vol. 276 , pp. 1-11.