

پایش سلامت پل جناح تهران با رویکرد حوزه زمان - فرکانس

سید علی موسوی گاوگانی^{۱*}، سجاد حیدری^۲

^۱دانشجو دکتری مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی-^۲دکتری تخصصی مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰)

چکیده

پل‌ها شریان‌های حیاتی در کشور بوده و جزء سازه‌های با اهمیت بالا طبقه‌بندی می‌شوند. بنابراین حفظ پایداری پل‌های کشور و بهبود عملکرد آن‌ها از جنبه‌های گوناگونی دارای اهمیت می‌باشد. اصلی‌ترین اهمیت این موضوع را می‌توان در قدیمی بودن اکثر پل‌های کشور دانست که اعمال بار دینامیکی ناشی از زلزله یا غیره می‌تواند منجر به خرابی آن‌ها شود. یکی از روش‌های مرسوم برای پایش سلامت سازه‌ها و به دنبال آن تشخیص موقعیت خرابی، پردازش سیگنال‌های سازه‌ای در حوزه زمان - فرکانس با استفاده از تبدیل موجک می‌باشد که کارآمدی آن توسط محققین بسیاری اثبات شده است. در این مطالعه به منظور ارزیابی روش بکار گرفته شده، به مطالعه یکی از پل‌های تقاطع غیرهمسطح جناح تهران با ماهیت صندوقه‌ای تحت سناریوهای خرابی مختلف پرداخته شده است. در این مطالعه از سیگنال اختلاف تغییرمکان قائم عرشه‌ی پل در حالت سالم و آسیب‌دیده تحت اثر بار مشخص به عنوان سیگنال ورودی تبدیل موجک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است با حداقل تعداد سنسور و یک مرتبه نمونه‌برداری موقعیت خرابی را با دقت مناسبی شناسایی کند.

کلید واژه‌ها: پایش سلامت سازه، مهندسی پل، تبدیل موجک گسسته، تشخیص آسیب، عرشه پل.

۱. مقدمه

پل‌ها با توجه به نقش حیاتی خود در حمل و نقل جزء شریان‌های حیاتی کشور و بخشی از سیستم‌های زیربنایی محسوب می‌شوند که همواره با توسعه شهرنشینی نیاز و تمایل به احداث انواع پل‌ها رواج پیدا می‌کند. پل‌ها را می‌توان از جهات گوناگون اعم از طول دهانه، سیستم سازه‌ای، مصالح مورد استفاده، شیوه ساخت، نحوه استفاده و غیره تقسیم بندی نمود. بطور کلی پل‌ها از اجزای مختلفی تشکیل یافته‌اند که یکی از مهمترین اعضای سازه‌ای پل‌ها عرشه می‌باشد. عرشه پل‌ها را نیز می‌توان به ۴ دسته کلی تقسیم نمود که شامل عرشه تیرورق، عرشه خرابی، عرشه شبکه‌ای و عرشه صندوقه‌ای (جعبه‌ای) می‌باشند [۱].

پل‌های صندوقه‌ای با توجه به مزایای منحصربفرد بصورت گسترده برای پل‌های بزرگراهی و پل‌های حمل و نقل ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مزایا می‌توان به سختی پیشی بسیار بالا، انتخاب شکل آیرودینامیک مناسب برای مقطع، اجرای راحتتر و زمان کمتر در ساخت این نوع پل، زیبایی بیشتر،

مرغوبیت جنس قطعات بدلیل تولید در کارگاه، مناسب برای بسیاری از مناطق که امکان قالب بندی و شمع گذاری وجود ندارد و ... اشاره کرد [۲].

این پل‌ها علی‌رغم مزایای بیشمار خود بخصوص در اجرا، بدلیل برخی موارد باید همواره بعد از بهره‌برداری و با دقت زیاد مورد بررسی قرار گیرند. به عنوان مثال، بدلیل اجرای مرحله به مرحله این نوع پل‌ها و همچنین تغییر سیستم استاتیکی پل، حفظ همبستگی و پایداری طره‌ها در طول عمر بهره‌برداری بایستی مورد پایش قرار گیرد. همچنین بدلیل فقدان اعضای تحمل کننده کشش اعم از میلگردها در محل درزها، در این نواحی امکان تحمل کشش وجود نداشته و ممکن است در طول مدت بهره‌برداری بدلائل گوناگون مشکل ساز گردد. بنابراین پایش این نوع پل‌ها می‌تواند از موضوعات مهم در این حوزه باشد. از طرفی خرابی اصلی‌ترین دلیل بروز انهدام در سازه‌های عمرانی می‌باشد. جلوگیری از انهدام‌های ناگهانی و به تبع آن خسارات جانی و مالی عدیده از مهمترین وظایف پژوهشگران در این زمینه می‌باشد. محققین با مطالعات گسترده به این نتیجه دست یافتند

که دلیل هر خرابی گسترده ناشی از مجموعه خرابی‌های کوچک می‌باشد که با رفع این موارد می‌توان از خسارات جانی و مالی جلوگیری نمود. لذا با توجه به این دیدگاه نیز می‌توان به اهمیت پایش پل‌ها اشاره کرد [۳].

روش‌های پایش به دو گروه مخرب و غیرمخرب تقسیم می‌شوند که روش‌های مخرب بدلیل تخریب بخشی از سازه تنها در پروژه‌های محدودی قابل استفاده می‌باشد [۴]، لذا تمایل به استفاده از روش‌هایی غیرمخرب بین محققین و مهندسين افزایش یافته است. روش‌های غیرمخرب خود به دو دسته محلی (موضعی) و کلی (جامع) تقسیم می‌شوند. در روش‌های موضعی بخش محدودی از سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۵]. معایب اصلی این روش‌ها صرف هزینه بالا و وقت زیاد می‌باشد و برای پیش‌بینی موقعیت خرابی نیز نیازمند در معرض دید بودن اعضای سازه دارد [۶]. همچنین در استفاده از روش‌های موضعی بایستی محل خرابی یا حدود آن مشخص باشد که ممکن است در مواردی غیرقابل تشخیص باشد و بنابراین استفاده از این روش‌های موضعی امکان نداشته باشد.

روش‌های کلی با حل معایب روش‌های محلی می‌توانند عملکرد مناسبی از خود نشان دهند. فلسفه وجودی این روش‌ها بر این ایده استوار است که هر گونه تغییر و خرابی در سازه باعث تغییر در سختی و میرایی سازه شده و به دنبال آن پارامترهای سازه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۷، ۸]. بنابراین استفاده از روش‌های کلی گستردگی زیادی در بین محققین پیدا کرده است [۹]. روش‌های کلی خود به سه دسته استاتیکی، دینامیکی و ترکیبی از هر دو تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۰]. مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش و تغییرمکان سازه تعریف شده‌اند. از جمله مشکلات روش‌های استاتیکی می‌توان به نیاز این روش‌ها به حجم وسیعی از داده‌های اندازه‌گیری شده اشاره کرد که منجر به غیراقتصادی شدن این روش‌ها می‌گردد. همچنین در این روش‌ها آزمایشات بر اساس بارگذاری استاتیکی انجام می‌پذیرند که برخلاف ماهیت بارگذاری واقعی سازه می‌باشد. در نتیجه ادامه تحقیقات بر روی روش‌های دینامیکی متمرکز گردید. روش‌های کلی دینامیکی با شناسایی تغییر در مشخصه‌های ارتعاشی سازه و سیگنال‌ها منجر به شناسایی آسیب می‌شوند. مطالعات انجام شده در این زمینه بر اساس دو الگوی کلی انجام می‌پذیرد که شامل روش‌های مبتنی بر داده‌های مودال و روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال می‌باشند. در روش‌های مبتنی بر داده‌های مودال تغییر در پارامترهای مودال اندازه‌گیری شده از جمله فرکانس‌های تشدید شده، میرایی مودال، شکل مودها و ... نشان دهنده تغییر در مشخصات فیزیکی و دینامیکی سازه می‌باشد. روش‌هایی همچون تغییر در فرکانس طبیعی [۱۱]، تغییر میرایی [۱۲]، تغییر در شکل مود [۱۳]، تغییر در انحنای شکل مودهای

ارتعاشی [۱۴] و غیره جزء روش‌های مبتنی بر داده‌های مودال می‌باشند [۱۵]. در برخی موارد و بخصوص در سازه‌های با درجات آزادی بالا، محاسبات مودال در مودهای بالا نیاز به تجهیزات پیشرفته و دانش بالا دارد که امری مشکل و در برخی موارد غیرممکن است. همچنین این روش‌ها نیاز به تجهیزات زیاد داشته و نسبت به شرایط مرزی نیز بسیار حساس هستند [۱۶]. بنابراین تمایل به استفاده از روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال افزایش یافته است. در این روش با پردازش تاریخیچه زمانی اندازه‌گیری شده از سازه نسبت به تشخیص تغییر و به دنبال آن خرابی اقدام می‌کنند. این دسته از روش‌ها نیز به سه گروه محدوده زمان، محدوده فرکانس و محدوده زمان - فرکانس تقسیم می‌شوند.

روش‌های پردازش سیگنال در محدوده زمان از توابع خطی و غیرخطی پاسخ‌های تاریخیچه زمانی استفاده می‌کنند تا بوسیله آن خصیصه‌های سیگنال را استخراج کنند. از نمونه‌های این روش می‌توان به مدل رگرسیون خودکار، میانگین متحرک رگرسیون خودکار، مدل رگرسیون خودکار با مدل برونی و فیلتر گسترش یافته کالمن اشاره کرد [۱۷، ۱۸]. بطورکلی با ظهور حوزه فرکانس در تحلیل مسائل، این حوزه نسبت به زمان بدلیل رونمایی از چهره دیگری از مسائل بیشتر مورد توجه قرار گرفت. همچنین در تحقیقات بسیاری به این موضوع اشاره شده که ایجاد خرابی تاثیر زیادی بر روی پاسخ‌های سیستم در حوزه زمان ندارد. لذا تحلیل داده‌های پایش سلامت در حوزه فرکانس نیز رواج پیدا کرد. روش‌های قلمرو فرکانس از تبدیل فوری و تبدیل فوری با زمان کوتاه برای استخراج مشخصه‌های سیگنال‌ها استفاده می‌کنند. از جمله روش‌های این حوزه نیز می‌توان به تابع پاسخ فرکانسی، طیف فرکانسی و توان طیفی اشاره کرد. در این نوع تحلیل اطلاعات زمانی و مکانی سیگنال بطورکلی از بین می‌رود و این مشکل در مواقعی که سیگنال غیرایستا باشد (در طول زمان تغییر کند)، مهمتر جلوه می‌کند [۱۹]. این دلایل باعث شد تا محققین از روش‌هایی استفاده کنند که هر دو حوزه زمان و فرکانس را پوشش دهد. بنابراین روش‌های حوزه زمان - فرکانس ارائه گردید که از جمله روش‌های این حوزه می‌توان به روش طیف نگاره، تبدیل موجک پیوسته، بسته‌های انرژی موجک و آنترپی موجک اشاره کرد. بیشتر تحقیقات صورت گرفته در این قلمرو از تحلیل موجک برای تشخیص خرابی استفاده کرده‌اند [۲۰].

برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ نیولند به توانایی تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی پی برد [۲۱]. اولین کاربرد این تحلیل در تشخیص آسیب مربوط به تشخیص ترک در تیرها بود [۲۲]. در ادامه بعد از بررسی سازه‌های تک بعدی، از این تکنیک در تشخیص خرابی سازه‌های صفحه‌ای استفاده شد

می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت که تبدیل موجک گسسته نمایشی بسیار ساده‌تر و در برخی موارد کارآمدتر از تبدیل موجک پیوسته را ارائه می‌کند [۲۷, ۲۸]. با توجه به آنچه بیان شد، مقدار دو فاکتور a و b در تبدیل موجک گسسته مطابق رابطه (۲) و بر اساس مقیاس دوتایی تعیین می‌گردند.

$$a = 2^j, \quad b = k.2^j \quad (2)$$

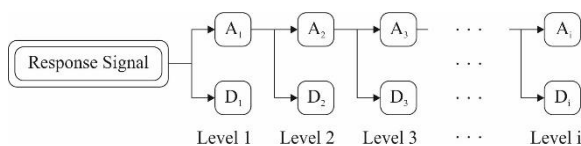
که در رابطه فوق j و k می‌توانند مقادیری از مجموعه اعداد صحیح را شامل شوند. با جاگذاری این مقادیر در رابطه (۱)، رابطه مربوط به تبدیل موجک گسسته $D(j, k)$ سیگنال زمانی $x(t)$ مطابق رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$D(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi(2^{-j}t - k) dt \quad (3)$$

در حقیقت تبدیل موجک گسسته همواره نقش یک فیلتر را بازی می‌کند که سیگنال ورودی را با استفاده از دو فیلتر به ضرایب تقریب و ضرایب جزئیات تجزیه می‌کند. به عبارتی سیگنال اصلی را می‌توان مطابق رابطه (۴) و بر اساس ضرایب تقریب (D) و جزئیات (A) تبدیل موجک گسسته تشکیل داد. با این کار سیگنال به دو بخش سیگنال با محتوای فرکانسی بالا و سیگنال با محتوای فرکانسی پایین تقسیم می‌شود.

$$x(t) = A_i + \sum D_i \quad (4)$$

که در رابطه فوق A_i و D_i به ترتیب معرف تقریب‌ها (محتوای فرکانسی پایین) و جزئیات (محتوای فرکانسی بالا) سیگنال هستند و i نیز نشان دهنده مرتبه تجزیه است. به عبارتی ضرایب تقریب حاصل از هر مرتبه تجزیه نیز می‌توانند دوباره به دو قسمت تقریب و جزئیات تقسیم شوند و با تکرار این عمل می‌توان چند مرتبه تجزیه از یک سیگنال داشت. فرآیند تجزیه تکرار پذیر است و از نظر تئوری می‌توان آن را به طور نامحدود ادامه داد لکن در عمل، انتخاب تعداد مناسب مرتبه تجزیه بستگی به ماهیت سیگنال مورد بررسی دارد. نمایی شماتیک از فرآیند تبدیل موجک گسسته در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱). نحوه تجزیه سیگنال با استفاده از تبدیل موجک گسسته

[۲۳]. اخیراً نیز مطالعات بسیاری با توجه به توانایی بالای تبدیل موجک در تشخیص خرابی انجام گردیده است [۲۴, ۲۵]. بررسی‌های فوق نشان می‌دهد که با وجود کارایی بالای روش‌های تبدیل موجک در شناسایی خرابی، اکثر مطالعات قبلی بر روی سازه‌های تیری شکل و در مواردی نیز سازه‌های صفحه‌ای متمرکز گردیده است. نقطه ضعف اکثر آن‌ها این است که از شکل مود به عنوان سیگنال ورودی موجک استفاده شده و منجر به پیچیدگی محاسبات می‌شود و در پژوهش حاضر از این موارد اجتناب شده است. از دیگر نکات برجسته مطالعه حاضر می‌توان به استفاده از تعداد محدودی سنسور با آرایش بسیار ساده برای پایش سلامت پل اشاره کرد. همچنین توانایی روش بکار گرفته شده در تشخیص انواع سناریوهای خرابی مختلف در یک سازه واقعی (پل جناح تهران) مورد بررسی قرار گرفته است. از سوی دیگر استفاده از تبدیل موجک گسسته بجای استفاده از تبدیل موجک پیوسته، مشکلات مربوط به انتخاب بازه صحیح فاکتور مقیاس را که محققان پیشین به آن اشاره کرده‌اند، از بین برده است.

۲. تبدیل موجک

بطور کلی موجک سیگنالی موجی شکل با بازه محدود است که میانگین مقادیر آن برابر صفر است. تبدیل موجک سیگنال را به موجک مادر مقیاس شده و انتقال یافته آن تبدیل می‌کند که با این کار منجر به شناسایی نقاط گسستگی و یا محل شیب‌های ناگهانی سیگنال زمانی می‌شود. تبدیل موجک دارای دو نوع مختلف پیوسته و گسسته است که تبدیل موجک پیوسته $C(a, b)$ سیگنال زمانی $x(t)$ را می‌توان مطابق رابطه (۱) تعریف نمود.

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

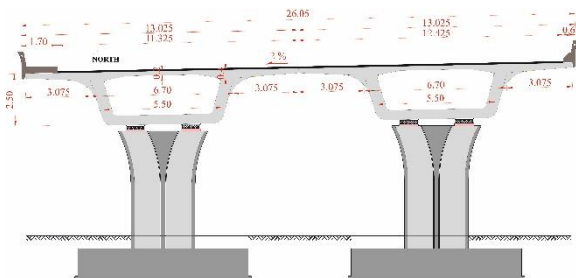
که در رابطه فوق $\psi(t)$ موجک مادر است که توسط فاکتور a مقیاس و توسط فاکتور b منتقل شده است. مقادیر هر دو فاکتور شامل مجموعه اعداد حقیقی هستند و این در حالی است که این مقادیر برای فاکتور a می‌بایست مثبت باشد [۲۶]. بنابراین مقدار فاکتور مقیاس و انتقال، اعدادی پیوسته هستند که به همین منظور جهت انجام تبدیل باید تعداد نامتناهی از موجک مادر مقیاس و منتقل شود. محاسبه ضرایب موجک در همه مقیاس‌های ممکن منجر به تولید حجم بسیار زیادی از داده‌ها می‌شود که به دنبال آن زمان بیشتری صرف محاسبات خواهد شد. بنابراین برخلاف تبدیل موجک پیوسته که در آن پارامترهای مقیاس و انتقال به صورت پیوسته تغییر می‌کنند، در تبدیل موجک گسسته این پارامترها به صورت غیر پیوسته انتخاب



شکل (۳). نمایی از پروژه تقاطع غیر همسطح جناح

پروژه تقاطع غیر همسطح جناح که نمایی از آن در شکل (۳) نشان داده شده است، شامل ۶ پل می‌باشد که همگی از نوع پل‌های صندوقه‌ای پیش ساخته پس کشیده می‌باشند. این پروژه شامل اجرای ۲ دستگاه پل اصلی قوسی به طول ۲۴۸ متر و مساحت ۱۱ هزار و ۶۸۸ مترمربع و نیز ۴ دستگاه پل جهتی به مساحت ۱۰ هزار و ۱۹۸ مترمربع در ۴ سطح بر روی پایه‌های بتنی است. پل‌های اصلی دارای ۱۴ پایه بوده و پل‌های جهتی نیز هر کدام ۴ پایه دارند.

در این بررسی دهانه سوم پل شماره ۱ این پروژه واقع در مسیر شرق به غرب بزرگراه شیخ فضل الله به طول ۴۸۰۰ سانتی‌متر در نرم افزار CSI Bridge مدل گردیده است که نمایی از مقطع عرضی این پل در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، مقطع این پل از کنار هم قرار گرفتن دو جعبه با شیب ۲ درصد تشکیل شده است و عرض کل مسیر ۲۶۰۵ سانتی‌متر می‌باشد. عرض مسیر این پل با استفاده از جداکننده نیوجرسی به دو قسمت تقسیم شده است. قسمت اول دارای ۴ خط عبور اصلی و ۱ خط اضطرار می‌باشد و قسمت دوم نیز از ۱ خط عبور اصلی (جهت اتصال به کندرو) و ۱ خط اضطرار تشکیل شده است. در مجموع این پل دارای ۷ مسیر عبور می‌باشد. همچنین عرض پیاده‌رو و قرنیز این پل نیز به ترتیب ۱۷۰ و ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل (۴). نمایی از مقطع عرضی پل شماره ۱ پروژه جناح

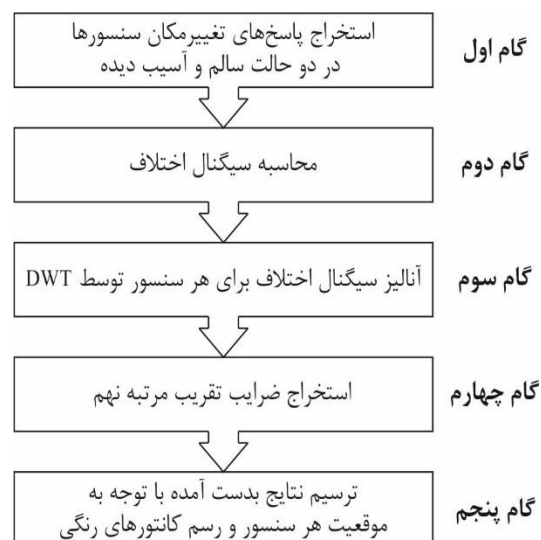
دهانه ۴۸ متری مورد مطالعه در این پژوهش در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵) این دهانه از کنار هم

۳. روش تشخیص خرابی پیشنهادی

برای شناسایی خرابی بر اساس روش پیشنهادی در این پژوهش، ابتدا لازم است پاسخ تغییرمکان قائم عرشه پل تحت بارگذاری مشخص و در نقاط قرارگیری سنسورها در حالت سالم ثبت گردد (S_{intact}). در ادامه بعد از اعمال سناریوی خرابی می‌بایست پاسخ سازه مجدداً تحت همان بارگذاری بدست آید ($S_{damaged}$). سپس سیگنال اختلاف پاسخ سازه سالم و آسیب دیده (ΔS) برای هر سنسور مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\Delta S = S_{intact} - S_{damaged} \quad (5)$$

در مرحله بعدی سیگنال اختلاف محاسبه شده برای هر سنسور با استفاده از تبدیل موجک گسسته مورد آنالیز قرار گرفته و ضرایب تقریب مرتبه نهم آن‌ها استخراج می‌شود و در نهایت با رسم منحنی ضرایب تقریب می‌توان موقعیت‌های محتمل آسیب‌های سطح عرشه را شناسایی نمود. گام‌بندی منظم روش ارائه شده بصورت شماتیک در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲). فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در تشخیص آسیب عرشه پل

۴. مطالعه عددی

در این مطالعه به منظور ارزیابی و بررسی روش تشخیص آسیب ارائه شده، به مطالعه پل جناح پرداخته شده است که در محدوده غربی شهر تهران و مابین میدان آزادی و فلکه دوم صادقیه و در تقاطع دو بزرگراه شیخ فضل الله و محمد علی جناح واقع گردیده است که در سال ۱۳۹۲ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

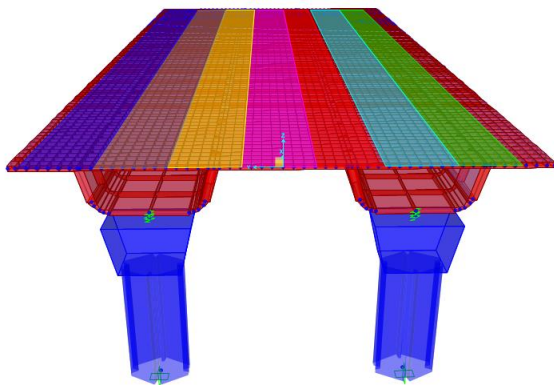


شکل (۶). نمایی از مقطع عرضی پل به همراه بارگذاری آن

جدول (۱). پارامترهای لازم در بارگذاری عرشه پل

پارامتر	مقدار
بار هر چرخ محور جلو	۲/۸ تن
بار کلی محور جلو	۵/۶ تن
بار هر چرخ محور عقب	۲/۸ تن
بار کلی محور عقب	۱۱/۲ تن
طول کل کامیون	۱۰ متر
فاصله محور جلو از محور وسط	۵/۲ متر
فاصله محور وسط از محور عقب	۱/۴۵ متر
عرض کل	۲/۴۳۵ متر

نماهایی از دهانه مدل شده به همراه لاین‌های عبوری در محیط نرم‌افزار در شکل (۷) نشان داده شده است.

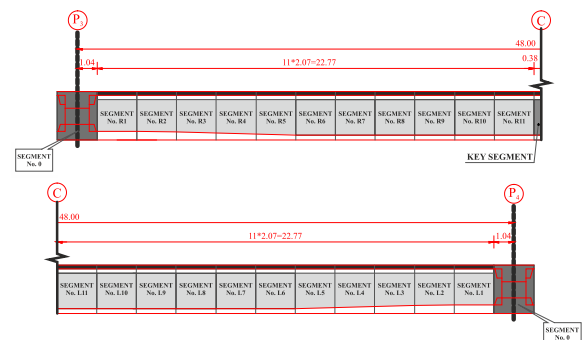


شکل (۷). تصویری از پل مدل شده در محیط نرم‌افزار

برای استخراج پاسخ تغییرمکان قائم پل تحت بارگذاری مشخص از ۱۰ سنسور در وسط دهانه و در راستای عمود بر محور عبوری پل و به فواصل مساوی استفاده شده است. در این مقاله به منظور ارزیابی روش پیشنهادی برای نمونه تعداد ۱۵ سناریوی خرابی مختلف بر روی عرشه پل به گونه‌ای تعریف شده است که تمامی سطح عرشه و حالات مختلف را پوشش دهد. این سناریوها شامل خرابی‌های یگانه (SD)، خرابی‌های دوگانه (DD) و خرابی‌های با ابعاد بسیار کوچک (SMD) می‌باشند. با توجه به مساحت بالای عرشه و به منظور افزایش دقت، سطح عرشه به چهار بخش مساوی A، B، C و D تقسیم شده که این تقسیم‌بندی در شکل (۸) نشان داده شده است. در این مقاله تمامی سناریوها بر بخش A متمرکز شده است ولی با این وجود نتایج قابل تعمیم به بخش‌های دیگر نیز می‌باشد.

قرار گرفتن ۲۲ جعبه (دو به دو متقارن) تشکیل شده است و دقیقاً وسط دهانه به طول ۳۸ سانتی‌متر تحت عنوان قطعه کلید بتن‌ریزی شده است. همچنین در این مطالعه نصف قطعه صفر (روی پایه) از هر طرف لحاظ گردیده است.

بتن مورد استفاده در قطعات پیش ساخته تابلیه این پروژه از نوع C35 و آرماتور اجدار AIII با حداقل حد جاری شدن ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می‌باشد. در طراحی سازه‌ای پل و بارگذاری از آیین‌نامه AASHTO استفاده شده است. همچنین پس کشیدگی پل با استفاده از کابل‌های هاپیراستاتیک و ایزواستاتیک ایجاد شده است. هر کدام از کابل‌های ایزواستاتیک و هاپیراستاتیک متشکل از ۱۲ رشته می‌باشند. هر رشته متشکل از ۷ سیم به قطر ۱۵/۲۴ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM A416 نوع Grade 270 با سطح مقطع ۱۴۰ میلی‌متر مربع و مقاومت گسیختگی ۱۸۶۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع با وادادگی کم می‌باشد. در این فرآیند نیروی اولیه کشیدن کابل‌ها ۲۳۸ تن فرض شده است.

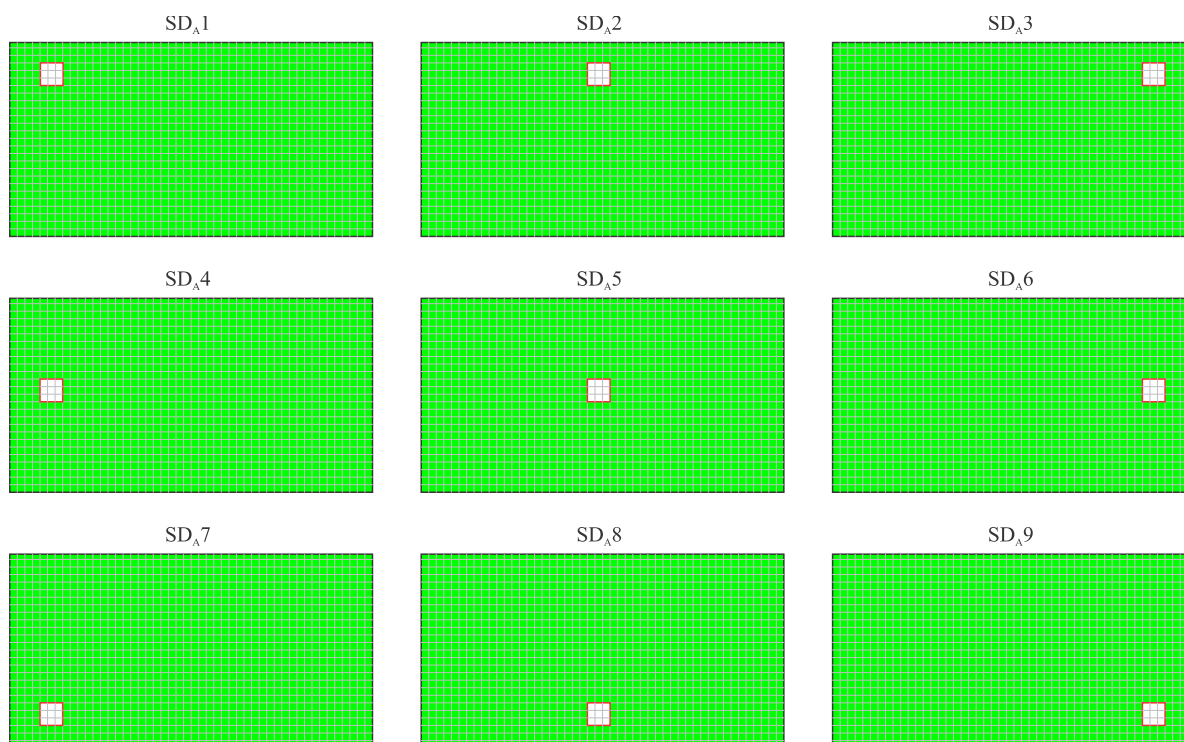
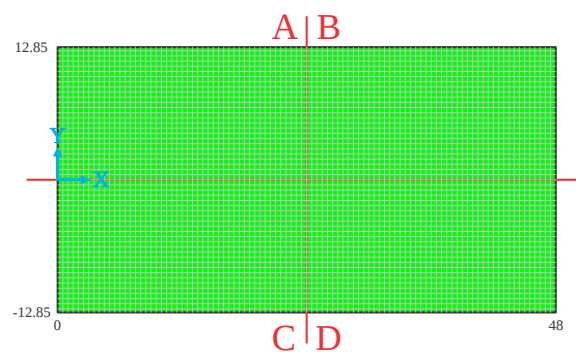


شکل (۸). نمایی از دهانه مورد مطالعه به همراه شماره سگمنت‌های پل

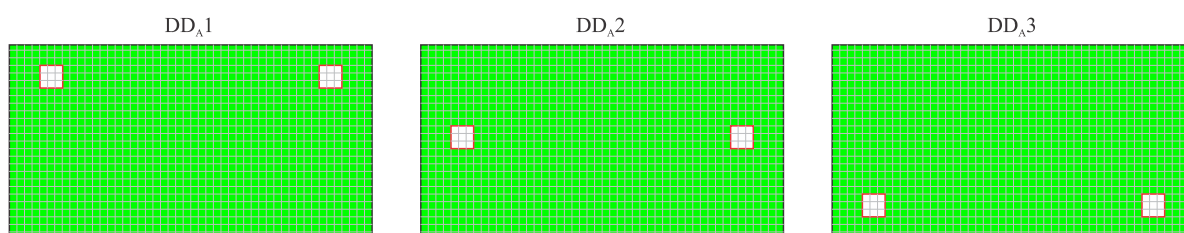
برای شناسایی آسیب با روش معرفی شده، لازم است تحریک مشخصی بر روی عرشه اعمال گردد و سیگنال‌های پاسخ شتاب در نقاط مشخص دریافت شوند. در ادامه می‌توان با دو مرحله انتگرال‌گیری از پاسخ شتاب به پاسخ تغییرمکان قائم عرشه نیز رسید. برای بارگذاری عرشه پل در دهانه موردنظر از ۷ کامیون ۲۸ تنی (به تعداد لاین عبوری) استفاده شده است. این ۷ کامیون به موازات هم از ابتدای دهانه با سرعت مشخص حرکت و به انتهای دهانه می‌رسند. نمایی شماتیک از بارگذاری اعمالی در شکل (۹) نشان داده شده است. در این بارگذاری برخی از پارامترهای موردنیاز مطابق آیین‌نامه در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل (۸). تقسیم‌بندی سطح عرشه به منظور تعریف سناریوهای خرابی

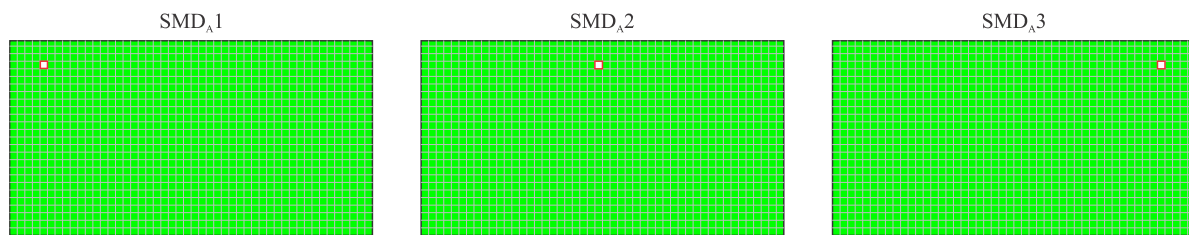
سناریوهای خرابی یگانه، دوگانه و با ابعاد کوچک به ترتیب در شکل‌های (۹) الی (۱۱) نشان داده شده است که اندازه هر مش 0.5 متر بوده و ابعاد خرابی‌های یگانه، دوگانه 1.5 در 1.5 متر (0.18 درصد از سطح عرشه) و با ابعاد کوچک 0.5 در 0.5 متر (0.02 درصد از سطح عرشه) می‌باشد.



شکل (۹). تعداد ۹ سناریوی خرابی یگانه در بخش A از سطح عرشه



شکل (۱۰). تعداد ۳ سناریوی خرابی دوگانه در بخش A از سطح عرشه



شکل (۱۱). تعداد ۳ سناریوی خرابی با ابعاد بسیار کوچک در بخش A از سطح عرشه

همچنین به منظور مقایسه جذاب بین نتایج در حالات مختلف، سعی شده است با استفاده از برخی تکنیک‌ها اعم از تقریب و برازش در برخی موارد و همچنین Smooth کردن منحنی، مقادیر محور قائم ثابت بماند.

در شکل (۱۲) نتایج مربوط به سناریوهای یگانه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر ۹ سناریو، ماکزیمم مقدار منحنی میانگین ضرایب در بازه خرابی از پیش تعریف شده قرار گرفته است و به عبارتی روش پیشنهادی قادر به تشخیص محدوده خرابی با دقت مناسب و بسیار نزدیک به محدوده دقیق خرابی در سطح عرشه می‌باشد.

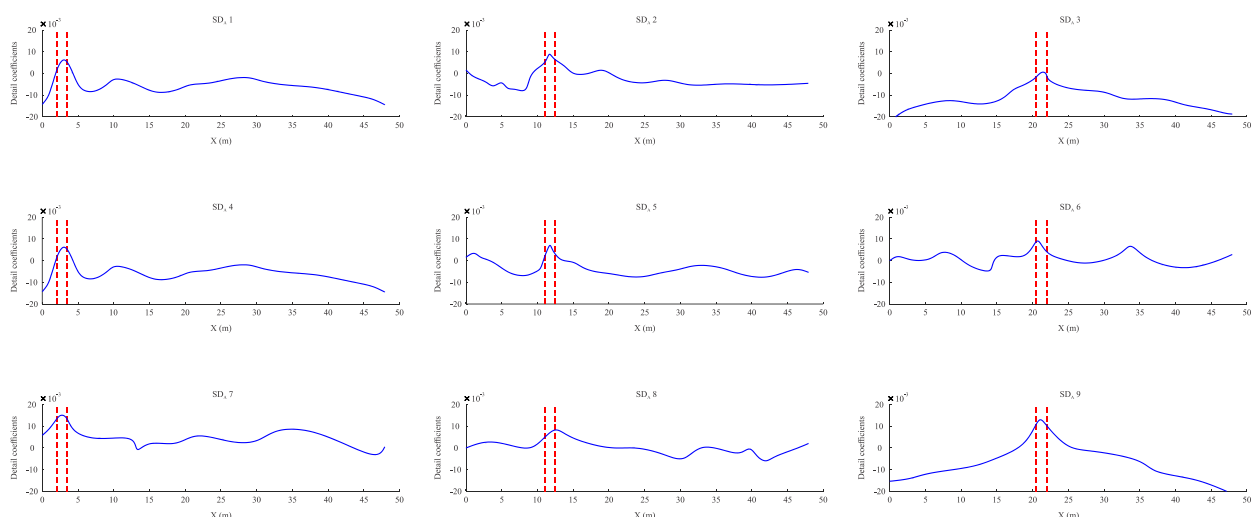
در شکل (۱۳) نیز نتایج مربوط به سناریوهای دوگانه ارائه شده است. نتایج این سناریو نیز گویای این موضوع می‌باشد که تحت تمامی سناریوها، منحنی میانگین ضرایب دارای ۲ قله می‌باشد که ناشی از دو آسیب تعریف شده در سطح عرشه است. همچنین تقریباً با دقت قابل قبولی بین ماکزیمم مقدار منحنی میانگین ضرایب و بازه نشان داده شده مطابقت وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد خرابی‌ها اندکی از میزان دقت در تشخیص موقعیت دقیق آسیب کاسته می‌شود، ولی با این حال روش مذکور می‌تواند اولاً احتمال وجود آسیب را به یقین تبدیل کرده و دوماً با خطای بسیار اندک که تقریباً در تمامی محاسبات ناگزیر به پذیرش آن هستیم، موقعیت خرابی را تعیین کند.

با توجه به لزوم تشخیص انواع خرابی‌ها بخصوص خرابی‌هایی با ابعاد کوچک در عرشه، نتایج مربوط به این سناریوها نیز در شکل (۱۴) ارائه شده که باز گویای دقت مناسب روش می‌باشد

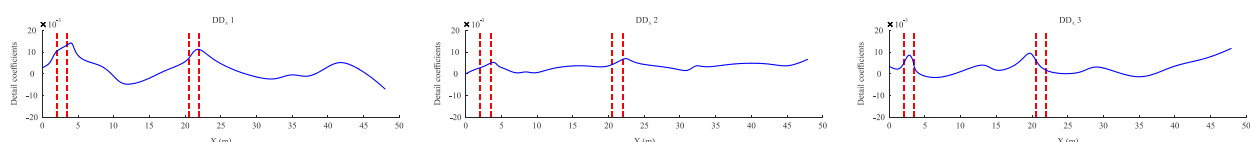
همانطور که قبلاً اشاره شد، در این پژوهش برای شناسایی خرابی مطابق روش معرفی شده از سیگنال اختلاف تغییرمکان قائم استفاده شده است که جزو ساده‌ترین شاخص‌های خرابی محسوب می‌شود. برای محاسبه سیگنال اختلاف تغییرمکان، مقدار تغییرمکان قائم ثبت شده توسط هر سنسور از سازه آسیب دیده مطابق رابطه (۵) از مقادیر تغییرمکان سازه سالم کم می‌شود. در ادامه این سیگنال با استفاده از تبدیل موجک تجزیه می‌گردد که این کار مطابق رابطه (۳) انجام می‌شود. برای بدست آوردن نتایج مطلوب بایستی موجک مادر مناسب انتخاب شود. در این مطالعه برای انتخاب موجک مادر از روش آزمون و خطا استفاده گردیده است. پس از انجام چندین مرتبه تجزیه سیگنال با استفاده از تبدیل موجک بصورت آزمون و خطا، موجک مادر دوبشیز مرتبه هشتم (db8) به دلیل ارائه بهترین نتایج تشخیص آسیب انتخاب گردید.

۵. نتایج و بحث

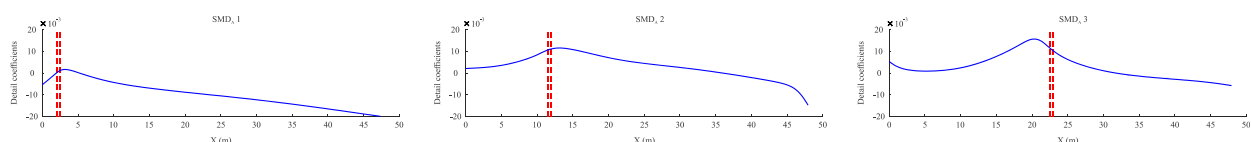
مطابق الگوریتم ارائه شده، بعد از محاسبه سیگنال اختلاف اقدام به استخراج ضرایب تقریب مرتبه نهم سیگنال اختلاف با استفاده از تبدیل موجک می‌کنیم که تغییرات میانگین ضرایب مستخرج از هر ۱۰ سنسور در راستای محور X عرشه پل و به ازای ۹ سناریوی خرابی SD در شکل (۱۲) نشان داده شده است. بر روی نتایج مربوط به هر سناریوی خرابی، مختصات محدوده خرابی تعریف شده در راستای محور X با استفاده از دو خط به رنگ قرمز و به صورت خط‌چین نشان داده شده است. مطابق تحلیل‌های صورت گرفته و بررسی‌های علمی، در نتایج مربوط به ضرایب تقریب سیگنال اختلاف، مختصات مربوط به ماکزیمم ضرایب حاصل از تبدیل موجک بیانگر موقعیت خرابی می‌باشد.



شکل (۱۲). منحنی میانگین ضرایب جزئیات هر ۱۰ سنسور برای سناریوهای یگانه



شکل (۱۳). منحنی میانگین ضرایب جزئیات هر ۱۰ سنسور برای سناریوهای دوگانه



شکل (۱۴). منحنی میانگین ضرایب جزئیات هر ۱۰ سنسور برای سناریوهای با ابعاد کوچک

موارد با دقت مناسب قادر است انواع خرابی‌ها با پراکندگی مختلف، تعداد مختلف، شدت مختلف، ابعاد مختلف و ... را شناسایی و موقعیت آن را نمایش دهد. همچنین نتایج نشان از

حساسیت بالای روش ارائه شده در برابر تغییرات ناگهانی و جزئی پاسخ دارند که این موضوع منجر به افزایش قابلیت اطمینان این روش گردیده است. بر اساس مطالعات پیشین بدیهی است با توجه به عدم قطعیت تعداد حسگرها، هرچه تعداد حسگرها افزایش یابد، نتایج قابل اعتماد تر و مطلوب تری حاصل خواهد شد. با این وجود روش ارائه شده با تعداد ۱۰ سنسور توانسته است نتایجی دقیق و مناسب از موقعیت‌های خرابی ارائه دهد. بطور کلی نتایج فوق نشان می‌دهد که استفاده از روش تبدیل موجک مبتنی بر سیگنال اختلاف تغییر مکان شناسایی

۶. نتیجه گیری

در این مطالعه روشی مبتنی بر تبدیل موجک و بر اساس کمترین تعداد سنسور، به منظور تشخیص خرابی عرشه پل جناح تهران ارائه شده است که در این روش سیگنال ورودی تبدیل موجک سیگنال اختلاف تغییر مکان عرشه پل در دو حالت سالم و آسیب دیده است. برای ارزیابی کارکرد روش پیشنهادی سناریوهای خرابی مختلفی در سطح عرشه پل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تمام مراحل مدلسازی خرابی‌ها بصورت کاهش صلبیت خمشی مدل گردیده‌اند که در واقعیت نیز انواع خرابی‌ها نظیر ترک‌های پراکنده در یک محدوده، ترک‌های مویی، پارامترهای خزش و انقباض و ... را شامل می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد این روش با دقت بسیار بالا و در برخی

Advanced structural damage detection: from theory to engineering applications. 2013.

[10]P. Antunes, et al., Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study. Measurement, 2012. **45**(7): p. 1695-1705.

[11]R. Sethi, S. Senapati and D. Parhi, Analysis of crack in structures using finite element method. Global Science and Technology Journal, 2014. **2**(2): p. 52-57.

[12]R. Curadelli, et al., Damage detection by means of structural damping identification. Engineering Structures, 2008. **30**(12): p. 3497-3504.

[13]U. Dackermann, Vibration-based damage identification methods for civil engineering structures using artificial neural networks. 2009.

[14]A. Dutta and S. Talukdar, Damage detection in bridges using accurate modal parameters. Finite Elements in Analysis and Design, 2004. **40**(3): p. 287-304.

[15]L. Qiao, Structural damage detection using signal-based pattern recognition. 2009: Kansas State University.

[16]B. Peeters, J. Maeck and G. De Roeck, Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects. Smart materials and Structures, 2001. **10**(3): p. 518.

[17]J.B. Bodeux and J.C. Golinval, Application of ARMAV models to the identification and damage detection of mechanical and civil engineering structures. Smart materials and structures, 2001. **10**(3): p. 479.

[18]Y. Liu, et al., Feature extraction and damage alarming using time series analysis. Journal of Southeast University (English Edition), 2007. **23**(1): p. 86-91.

[19]L. Qiao, A. Esmaeily and H. Melhem. Structural Damage Diagnosis Using Signal Pattern-Recognition Intelligent Computing. in Proceedings of 15th Annual Workshop of the European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE), Plymouth, UK. 2008.

[20]M.E. Zitto, et al., Damage assessed by wavelet scale bands and b-value in dynamical tests of a reinforced concrete slab monitored with acoustic emission. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015. **60**: p. 75-89.

خسارت بهتری را فراهم می کند.

در نهایت بطور کلی بررسی نتایج و تفاسیر حاصل از این تحلیل ها نشان می دهد که این روش جدید می تواند بدلیل ماهیتی ساده و اقتصادی و البته دقت مناسب مورد توجه قرار گیرد. برخلاف اکثر روش های موجود پایش سلامت، روش ارائه شده مدل محور نبوده و بدون اطلاع قبلی از حدود خرابی، قادر به تشخیص خرابی و مشخص نمودن محل دقیق آن می باشد. همچنین این روش برخلاف اکثر روش ها نیازی به محاسبات دشوار و پیچیده فرکانس های طبیعی و مودهای ارتعاشی پل نداشته و تنها با دریافت پاسخ تغییر مکان قائم می تواند ادامه الگوریتم تشخیص خرابی را طی نماید.

۷. مراجع

[1]AASHTO 2nd, Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1998.

[2]P. Sideris, et al., Seismic performance of precast segmental bridges. in 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders. 2010.

[3]A. Mahmoudian Azar Sharabiani and M. Babaianpour, Prioritizing the Resistance Economics Criteria Affecting the Production Boom Using Theory of Inventive Problem Solving. Construction science and technology, 2021. **1**(4): p. 11-26. (In Persian)

[4]M.J. Khosraviani, O. Bahar and S.H. Ghasemi, Damage detection in continuous deck bridges using statistical cross-correlation function method. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2020.

[5]C.J. Hellier, Handbook of nondestructive evaluation. 2013: McGraw-Hill Education.

[6]H. Lam, Detection of damage location based on sensitivity and experimental modal analysis. MPH dissertation, Hong Kong Polytech. Univ., Hong Kong, 1994.

[7]M.J. Whelan, et al., Real-time wireless vibration monitoring for operational modal analysis of an integral abutment highway bridge. Engineering Structures, 2009. **31**(10): p. 2224-2235.

[8] Y. Shabani and P. Ghaderi, Damage Detection Based on Modal Parameters and Dynamic Responses using by Enhanced Grey Wolf Optimization. 2021.

[9]T. Stepinski, T. Uhl and W. Staszewski,

[21]D.E. Newland, An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis. 2012: Courier Corporation.

[22]K.M. Liew and Q. Wang, Application of wavelet theory for crack identification in structures. Journal of engineering mechanics, 1998. **124**(2): p. 152-157.

[23]W. Fan and P. Qiao, A 2-D continuous wavelet transform of mode shape data for damage detection of plate structures. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(25-26): p. 4379-4395.

[24]J. Santos, H. Lopes and A. Katunin. Damage Identification in Beams by Post-processing Modal Displacements and Rotations with Haar Wavelet. in European Workshop on Structural Health Monitoring. 2020. Springer.

[25]T.Q. Nguyen, et al., A data-driven approach based on wavelet analysis and deep learning for identification of multiple-cracked beam structures under moving load. Measurement, 2020. **162**: p. 107862.

[26]R. Nishat Toma and J.-M. Kim, Bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms. Applied Sciences, 2020. **10**(15): p. 5251.

[27]F.A. Alturki, et al., EEG signal analysis for diagnosing neurological disorders using discrete wavelet transform and intelligent techniques. Sensors, 2020. **20**(9): p. 2505.

[28]M. Alafeef and M. Fraiwan, Smartphone-based respiratory rate estimation using photoplethysmographic imaging and discrete wavelet transform. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020. **11**(2): p. 693-703.

