

چکیده

در این مقاله یک روش جدید تشخیص خرابی بر اساس تبدیل هیلبرت- هوانگ پاسخ‌های اندازه‌گیری شده سازه تیر ارائه شده است. توابع مودی ذاتی پاسخ‌های دینامیکی سازه با استفاده از تجزیه مودی تجربی در نقاط مشخص محاسبه شده و تبدیل هیلبرت برای محاسبه دامنه آنی بر روی هر تابع مودی ذاتی به کار برده شده است. ضریب همبستگی و تابع همبستگی متقابل دامنه آنی پاسخ‌های سالم و خراب سازه محاسبه شده‌اند. محل خرابی از طریق تعریف پارامتر شاخص خرابی و مقایسه نمودار آنها در حالت‌های سالم و خراب به دست آمده‌اند. برای ارزیابی و دقت روش یک مدل المان محدود سازه تیر بتنی دو دهانه مدل شده است. پاسخ‌های دینامیکی تیر با استفاده از تحلیل عددی تحت بارگذاری مثلثی مشخص به دست آمده‌اند. با توجه به نوفه‌های اندازه‌گیری، به پاسخ‌های دینامیکی مقادیر نوفه اضافه شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان دادند که روش ارائه شده محل خرابی را با دقت خوبی تشخیص می‌دهد.

واژگان کلیدی: تشخیص خرابی، تبدیل هیلبرت هوانگ، تجزیه مودی تجربی، ضریب همبستگی.

تشخیص خرابی سازه تیر با استفاده از تحلیل آماری پاسخ‌های اندازه‌گیری شده و تبدیل هیلبرت- هوانگ

محمدجواد خسرویانی

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

مجید قاسمی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، m.ghasemi@qiau.ac.ir

۱- مقدمه

است شامل: ۱- مشاهده مستقیم چشمی، بخش آسیب دیده سازه در صورتی که با عناصر غیر سازه‌ای پوشانده نشده باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد [۳]؛ ۲- روش آزمایش‌های غیر مخرب شامل اشعه ایکس، ارتعاشات، نشر آکوستیک، انتقال گرما و روش التراسونیک [۲]؛ ۳- شناسایی پارامترهای مودال سازه آسیب دیده از طریق پردازش ارتعاشات سیگنال که بر اساس تغییرات مشخصات دینامیکی مانند: فرکانس، میرایی و شکل مود سازه‌ها می‌باشند [۴]. برخی از این روش‌ها زمانی که برای سازه‌های مهندسی به کار برده می‌شوند با شکست روبرو می‌شوند که دلایل اصلی آن می‌تواند حساسیت کم پاسخ سازه به محل خرابی و یا دقت پایین حس گرهای اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه باشند [۵-۶]. اما به دلیل ارزیابی دقیق و هزینه کم روش‌های پردازش سیگنال، این روش پیشرفت‌های زیادی داشته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به تحلیل فوریه، تبدیل موجک، توزیع ویگنر ویل و تبدیل هیلبرت- هوانگ اشاره کرد.

سازه‌ها در طول عمر خود با بسیاری از حوادث طبیعی و غیرطبیعی از قبیل: زلزله، طوفان، انفجار و ... مواجه می‌شوند و این حوادث مخرب آسیب‌هایی را در سازه‌ها ایجاد می‌کنند. برای تعیین محل خرابی ایجاد شده ناشی از این حوادث در سازه و شناسایی مشخصات آن، موضوع مهم پایش سلامت سازه مطرح می‌گردد که این موضوع به یکی از چالش‌های مهم مهندسی در دهه‌های اخیر تبدیل شده است و مقالات زیادی در دهه‌های اخیر با روش‌های مختلف حول موضوع پایش سلامت ارائه شده است [۱]. پایش سلامت سازه شامل بررسی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده سیستم از طریق نصب حس گر بر روی آنها در یک مدت مشخص و تعیین محل خرابی سازه با استفاده از ابزارهای پردازش پاسخ سیستم می‌باشد. خرابی نیز می‌تواند شامل فرم‌های مختلفی از قبیل: ترک‌ها، حفرات، لایه لایه شدگی و یا ترکیبی از اینها باشد [۲].

روش‌های متفاوتی برای تعیین خرابی در سازه‌ها ارائه شده

مهندسی که توسط بارهای تصادفی تحریک شده اند مناسب است [۱۴-۱۵].

با توجه به معایب و مزایای روش های قبل، نیازمند یک روش قدرتمند برای پردازش سیگنال های غیرخطی و نامانای می باشد که دارای تکنیک مناسب برای تحلیل پاسخ های سازه است. هوانگ روش تبدیل هیلبرت- هوانگ را برای پردازش داده های غیرخطی و نامانای معرفی کرد. این روش شامل تجزیه مودی تجربی که با تبدیل هیلبرت سیگنال ترکیب شده است می باشد [۱۶]. تجزیه مودی تجربی یک روش دریافت کامل داده و تجزیه سیگنال به مجموعه ای از توابع مودی ذاتی نوسانی است. سپس تبدیل هیلبرت برای هر تابع مودی ذاتی که در دامنه زمان فرکانس تجزیه شده است به کار می رود. این پردازش به صورت کامل توسط دانلی و راجرز [۱۷] از طریق چندین مثال عددی توضیح داده شده است. روش هیلبرت هوانگ به طور موفقیت آمیزی برای تعیین مشخصات دینامیکی سازه ها و تشخیص خرابی آنها به کار گرفته می شود. یانگ و همکارانش [۱۸] تبدیل هیلبرت هوانگ را برای تعیین نسبت میرایی و فرکانس طبیعی سیستم بر اساس دامنه آنی و زاویه فاز حاصل به کار گرفت. وو و همکارانش [۱۹] روشی بر اساس تبدیل هیلبرت هوانگ برای پایش سلامت سازه مهندسی تحت ارتعاش محیطی را ایجاد کردند و طیف هیلبرت هوانگ و تحلیل طیفی ذاتی بر اساس تبدیل هیلبرت هوانگ به کار گرفته شد و بر اساس طیف ایجاد شده فرکانس های سازه تعیین گردید. کوئک و همکارانش [۲۰] متناسب بودن روش هیلبرت هوانگ را برای تشخیص مسائل خرابی از قبیل: تیر آلومینیومی همراه با ترک، تیر آلومینیومی همراه با پوسته شدگی داخلی، دال بتنی مسلح با سطح خرابی متفاوت را نشان دادند. نتایج حاصل نشان داد که ترک و پوسته شدگی در تیرهای هم جنس می تواند به طور دقیق مشخص شود و خرابی در دال بتنی مسلح در صورتی که اگر قبلاً در اولین ترک بارگذاری شود، می تواند تعیین گردد. چراغی و طاهری [۲۱] مشخصات ارتعاش لوله های پلاستیکی را با استفاده

در طول دهه های اخیر تعداد روش های پایش سلامت سازه و تشخیص خرابی مبتنی بر ارتعاش، توسعه زیادی پیدا کرده است و بسیاری از تحقیقات سه دهه اخیر را تحت تأثیر خود قرار داده است. هدف این روش ها تعیین تغییرات حاصل در مشخصات مودال سازه شامل: فرکانس طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی سازه می باشد. برای مثال اساس روش تبدیل سریع فوریه^۱ (FFT) تعیین پارامترهای مودال سازه از داده های ارتعاش تصادفی در محدوده فرکانسی می باشد. لیتلر و الیس [۷] متوجه شدند که روش تبدیل سریع فوریه میرایی مودال را می تواند تخمین بزند، اما این روش ها برای آشکار ساختن مقدار خرابی در سازه های مرکب دقت بالایی ندارند [۸-۱۰]. اما تحلیل زمان فرکانس برای غلبه بر محدودیت های روش فوریه که مهم ترین آن عدم فراهم کردن محدوده فرکانس- زمان یک سیگنال بود، معرفی شده است. اولین مورد از تحلیل زمان فرکانس، روش تبدیل زمان کوتاه فوریه^۲ (STFT) بر اساس تبدیل فوریه داده های تقسیم شده از طریق تابع پنجره زمانی تقسیم شده بود. بر اساس این روش تعامل میان زمان و فرکانس به دلیل وجود تابع پنجره زمانی مشکل می باشد به این دلیل که اگر پنجره ها در بخش زمان کوچک تر باشد، دقت آن بالا می رود و در بخش فرکانس دقت آن کم تر می شود و برعکس. همین موضوع باعث محدودیت در روش تبدیل زمان کوتاه فوریه شده است. در میان روش های تحلیل زمان فرکانس برای پایش سلامت، تحلیل موجک یکی از روش های مهم شناخته شده در پانزده سال اخیر است [۱۱-۱۲]. تبدیل موجک^۳ یک روش فوریه پنجره ای سازگار است و سیگنال های نامانای برای سیستم خطی را پردازش می کند [۱۳]. این روش قادر به حل کردن تغییرات آهسته فرکانس آنی است. اگرچه این روش یک محدوده زمانی فرکانس یکنواخت را فراهم می کند، اما به دلیل اندازه محدود شده موجک مادر به صورت کلی دارای ضعف است. با توجه به این ضعف ها، تحلیل موجک یکی از بهترین روش های حاضر تحلیل زمان فرکانس می باشد و برای تعیین پارامترهای مودال سازه های

مودی محاسباتی در وضعیت‌های مختلف سازه، شناسایی آسیب در سازه پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که با توجه به استفاده از تعداد معدودی از مودهای سازه، روش ارائه شده بسیار کارآمد است و در پایش سلامت سازه‌ها مؤثر خواهد بود [۲۴]. ژانگ و همکارانش [۲۵] یک روش جدید پالایش بر اساس پردازش گروه تجزیه مودی تجربی و آستانه موجک برای تعیین پارامترهای مودال یک نیروگاه ارائه کردند. در این روش شاخص نوفه برای تعیین درجه نوفه اجزای تجزیه شده با روش گروه تجزیه مودی تجربی و آستانه موجک بیان شد. در نهایت شاخص مطرح شده با روش‌های دیگر از قبیل: ERA^۵ و آنتروپی تنها^۶، برای بررسی عملکرد آنها بر روی پاسخ‌های جابه‌جایی یک نیروگاه برق آبی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که روش ارائه شده توانایی کافی برای کاهش نوفه‌های زیاد را دارد.

موضوع بارگذاری در پایش سلامت سازه یکی از بحث‌های مهمی است که در مقالات زیادی بدان پرداخته شده است. همچنین بحث پایش بار سیستم‌ها یکی از شاخه‌های پایش سلامت سازه می‌باشد که بر اساس آن در مورد نوع بار، مقدار آن و نحوه اثر آن بر روی سازه بحث و بررسی انجام می‌شود [۲۶]. برای مثال ونگ و سان [۲۷] از یک سری مصالح بسیار کوچک برای تولید قطعات کامپوزیت استفاده کردند و در انتها برای آزمودن آنها از بارهای دینامیکی خصوصاً بارهای ضربه‌ای مثلثی استفاده کردند. در این تحقیق مدل ساخته شده واقعی با مدل‌سازی المان محدود نیز مدل شد و آزمایش‌های تنش و کرنش با مدل اصلی ساخته شده در آزمایشگاه و مدل تحلیلی به مقایسه پرداخته شد. در نهایت با استفاده از این مصالح در سازه مقادیر دینامیکی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین اپدهیبی و همکارانش [۲۸] یک روش تحلیلی - عددی جدید برای پاسخ‌های جابه‌جایی دینامیکی غیرخطی صفحات کامپوزیتی تحت بارهای مختلف ضربه‌ای ارائه کردند. در این تحقیق بارهای مختلف تحت آزمایش قرار گرفتند که یکی از بارهای ضربه‌ای، بار مثلثی بود.

از حس‌گرهای پیزوالکتریک و ترکیب با تبدیل هیلبرت هوانگ مورد مطالعه قرار دادند. یک بخش آزمایشگاهی و تحلیلی به کار برده شد تا نشان دهد که با ترکیب چندین روش استفاده شده می‌توان میرایی مصالح را ارزیابی کرد. در نهایت تحقیقات آزمایشگاهی نشان داد که نتایج حاصل قابل مقایسه با مدل تحلیل المان محدود خواهد بود و دقت خوبی را خواهد داشت. مسافره و همکارانش [۲۲] یک روش ساده و مؤثر برای تعیین شدت خرابی و زمان خرابی یک مدل آزمایشگاهی سازه سه درجه آزاد با استفاده از روش جداسازی کور^۴ را مطرح کردند. به منظور تأیید روش ارائه شده از چندین تحلیل زمان-فرکانس از قبیل: تبدیل هیلبرت، مدل‌سازی خودکار پس‌رونده متغیر با زمان استفاده شد و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت با استفاده از روش جداسازی کور شدت و زمان خرابی سازه به دست آمده و مقایسه آن با روش‌های زمان-فرکانس تأیید صحت روش ارائه شده را نشان داد. ون‌کین و همکارانش [۲۳] با استفاده از انتشار موج آکوستیک در مصالح بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های CFRP و روش تبدیل هیلبرت- هوانگ به تعیین فرکانس آبی و تعیین خرابی پرداختند. پس از به دست آوردن موج‌های انتشار آکوستیک، مقادیر توابع مودی ذاتی موج‌ها با استفاده از پردازش تجزیه مودی تجربی محاسبه شد و از طریق تبدیل هیلبرت فرکانس‌های آبی توابع مودی ذاتی در سطوح مختلف خرابی به دست آمدند. نتایج نشان دادند که نقاط پیک فرکانسی موج‌های آکوستیک تأثیر زیادی در خرابی خواهند داشت و خرابی‌های مختلف با استفاده از فرکانس‌های آبی با دقت مناسبی قابل تعیین خواهند بود. قدرتی و همکارانش [۲۴] روشی برای تعیین موقعیت و شدت آسیب به وجود آمده در اتصالات یک سازه قاب خمشی ۷ طبقه بتنی و یک قاب خمشی ۵ طبقه فولادی با بهره‌گیری از ویژگی‌های مودال سازه ارائه کردند. با استفاده از پردازش شتاب پاسخ ارتعاش آزاد سازه به کمک تبدیل هیلبرت- هوانگ، فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی سازه تخمین زده شده و با مقایسه‌ی انحنای شکل‌های

خرابی انرژی پردازش مودی تجربی پرداختند. برای تحریک لوله‌ها از دو نوع بارگذاری ضربه و موج chirp استفاده شده است. پس از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی مشخص شد که محل خرابی در هر دو حالت بارگذاری با دقت مناسبی تعیین شده است. مایکل و همکارانش [۳۳] با استفاده از پاسخ‌های ارتعاشات سالم و آسیب دیده تیر کامپوزیت در شرایط دمایی مختلف و روش تبدیل هیلبرت- هوانگ به تشخیص خرابی در تیر پرداختند. با استفاده از یک میز لرزان پاسخ‌های شتاب حاصل از تیر به دست آمد و از طریق پردازش تجزیه مودی تجربی توابع مودی ذاتی آنها محاسبه شد. در نهایت اثرات خرابی در ارتعاشات اندازه‌گیری شده از روش تجزیه مودی تجربی و طیف‌های هیلبرت- هوانگ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش هیلبرت- هوانگ توانایی مناسبی برای تعیین خرابی در تیر کامپوزیت تحت شرایط دمایی مختلف را دارد. ردی و کریشنا [۳۴] روشی جدید برای تشخیص خرابی با استفاده از تجزیه مودی تجربی سیگنال‌های فضایی مطرح کردند. برای شاخص خرابی از تفاوت میان داده‌های سیگنال‌های کرنشی و انرژی کرنشی برای تیر و پل با استفاده از روش تجزیه مودی تجربی استفاده کردند. خرابی‌های مختلف در تیر و پل از طریق کاهش سختی خمشی ایجاد شد و تعیین خرابی در آنها صورت گرفت. نتایج نشان داد که پردازش مودی تجربی برای حالات مختلف خرابی از حساسیت بالایی برخوردار خواهد بود.

روش تبدیل هیلبرت هوانگ به‌عنوان یکی از ابزارهای هوشمند پردازش سیگنال برای پایش سلامت سازه در سال‌های اخیر تبدیل شده است. با اینکه تبدیل موجک هنوز توسط برخی از محققان استفاده می‌شود، اما روش هیلبرت هوانگ پتانسیل بالایی برای تحلیل داده‌های غیرخطی و ناماننا دارد. به همین منظور کوئک و همکارانش [۳۵] نتایج حاصل از تحلیل موجک را با نتایج حاصل از تجزیه مودی تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که تجزیه مودی تجربی یک روش مستقیم برای استخراج اطلاعات مورد نیاز برای هدف تشخیص خرابی فراهم می‌کند.

فرمول‌سازی ریاضی بر اساس شیب جابه‌جایی مرتبه سوم تئوری صفحه انجام گرفت. در این تحقیق اثرات مقدار و شدت بارهای ضربه‌ای، شرایط مرزی و پارامترهای جابه‌جایی مرکزی صفحه و پاسخ لنگر خمشی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت بر اساس نوع بار و شدت آن فرمول‌های مشخصی ارائه شده است.

برخی از روش‌های تشخیص خرابی که بر اساس پردازش سیگنال ارتعاش‌های سازه ارائه شده است به این صورت است که یک شاخص خرابی به‌عنوان تفاوت میان پاسخ سازه سالم و خراب معرفی شده است. چن و ژو [۲۹] تعیین خرابی را در بیان تغییرات سختی در یک سازه سه طبقه از طریق تجزیه مودی تجربی تخمین زدند. محل خرابی زمان رخداد از طریق مشخصات غیرعادی در توابع مودی ذاتی به درستی تعیین شد. چراغی و طاهری [۳۰] مشخصات دینامیکی یک سیستم مکانیکی شش درجه آزادی از قبیل: فرکانس طبیعی، میرایی و شکل مود را با روش تبدیل هیلبرت هوانگ به درستی تعیین کردند. بعد از مقایسه این پارامترها برای سازه سالم و خراب، به یک شاخص انرژی تجزیه مودی تجربی برای تعیین خرابی دست یافتند. زرافشان و انصاری [۳۱] با استفاده از روش هیلبرت هوانگ و دامنه آنی هیلبرت یک شاخص خرابی برای یک پل ایجاد کردند. بدین صورت که از طریق روش تجزیه مودی تجربی، توابع مودی ذاتی پاسخ دینامیکی یک پل سه دهانه فلزی را به دست آوردند و از طریق به کار بردن تبدیل هیلبرت بر روی اولین تابع مودی ذاتی، دامنه آنی سیگنال تحلیلی را محاسبه کردند. همچنین از ارتباط شاخص انرژی و دامنه آنی یک ماتریس شاخص خرابی تعریف کردند که با رسم گراف‌هایی محل خرابی در پل تعیین شد. برای ارزیابی روش ارائه شده نتایج مدل‌سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد. روش ارائه شده نشان داد که توانایی تعیین خرابی تک و چندگانه را در مدل‌های عددی به‌خوبی نتایج آزمایشگاهی دارد. رازی و طاهری [۳۲] با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی به تشخیص محل خرابی بر روی لوله‌های دریایی از طریق شاخص

سوم اسپلاین به هم متصل می‌شوند که پوش بالای آن با $x_{\max}(t)$ و پوش پایین $x_{\min}(t)$ نمایش داده می‌شود، ۳- پوش میانگین سیگنال حاصل $m_1 = (x_{\max}(t) + x_{\min}(t)) / 2$ تعیین می‌شود و سپس سیگنال اولیه از زده شود $h_1(t) = x(t) - m_1$. این روند برای تعیین تخمین بهتر اولین تابع مودی ذاتی تکرار می‌شود. با توجه به اینکه $h_1(t)$ به عنوان داده ورودی جدید سیگنال $x(t)$ می‌باشد، مراحل قبل تا زمانی که معیار توقف مناسب حاصل گردد تکرار می‌شود، ۴- در نهایت سیگنال اولیه به اولین تابع مودی ذاتی c_1 و باقی مانده r_1 تجزیه می‌شود $x(t) = c_1 + r_1$. باقی مانده نیز از تفریق تابع مودی ذاتی اول از سیگنال اولیه حاصل می‌شود. $I = x(t) - c_1$ که r_1 به عنوان ورودی جدید سیگنال $x(t)$ در نظر گرفته می‌شود تا با تکرار مراحل قبل تابع مودی ذاتی دوم نیز حاصل گردد. زمانی که پردازش غربالگری انجام می‌شود نکات مهمی وجود دارد که باید توجه شود از قبیل: حذف سیگنال‌های سوار^{۱۱} و هموارسازی دامنه‌های ناهموار آن. به علاوه هوانگ اشاره کرده است که باید به برازش درجه سوم نوار باریک^{۱۲} کنار مرزهای سیگنال‌ها توجه خاصی کرد. بنابراین هوانگ یک تقریبی برای تعیین پردازش غربالگری از طریق تعریف انحراف استاندارد که به عنوان معیار توقف نیز مطرح می‌شود برای رسیدن به تخمین بهتر اولین تابع مودی ذاتی بیان کرده که در رابطه زیر مشخص می‌باشد:

$$S.D = \sum \left[\frac{(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))^2}{(h_{1(k-1)}(t))^2} \right] \quad (1)$$

که h_{1k} به عنوان تکرار مرحله سوم برای k بار می‌باشد. مقدار S.D در رابطه ۱ بین ۰/۲ و ۰/۳ می‌باشد.

پردازش غربالگری زمانی که آخرین تابع مودی ذاتی یا همان باقی مانده، هیچ اکسترممی نداشته باشد، متوقف می‌گردد. بنابراین سیگنال اولیه طی پردازش تجزیه مودی تجربی به صورت مجموعه‌ای از توابع مودی ذاتی و باقی مانده تقسیم می‌شود که به صورت زیر می‌باشد:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n \quad (2)$$

در این مقاله روش مناسبی برای توسعه روش تشخیص خرابی بر طبق تبدیل هیلبرت هوانگ بر روی پاسخ‌های دینامیکی سازه ارائه شده است. این روش به محاسبه ماتریس ضریب همبستگی بین حس گرها در حالت سالم و خراب و همچنین به محاسبه تابع همبستگی متقابل حس گرهای سالم و خراب سازه از طریق ارتباط دامنه آنی با ابزارهای آماری مذکور می‌پردازد. دامنه آنی همه حس گرهای موجود در سازه برای حالت‌های سالم و خراب از روش هیلبرت هوانگ محاسبه شده است و تحلیل‌های آماری بر روی آنها صورت گرفته است. در نهایت با معرفی شاخص خرابی محل خرابی در تیر مشخص می‌شود. در بخش‌های بعدی در ابتدا مفهوم تجزیه مودی تجربی و تبدیل هیلبرت به صورت خلاصه معرفی شده است و سپس ابزارهای آماری برای تشخیص خرابی بر اساس روش هیلبرت هوانگ مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد روش ارائه شده برای مثال‌های عددی نشان می‌دهد که محل خرابی به خوبی قابل تشخیص خواهد بود.

۲- تجزیه مودی تجربی (EMD)^۷

هوانگ و همکاران [۱۶] کاربرد روش تجزیه مودی تجربی برای تجزیه داده‌های زمانی به توابع مودی ذاتی^۸ IMF مطرح کردند. یک تابع مودی ذاتی، یک تابع نوسانی است که باید دو ویژگی مهم را برآورده سازد: ۱- تعداد محل‌های قطع محور افقی^۹ با تعداد نقاط ماکزیمم و مینیمم برابر است و ممکن است در یکی اختلاف داشته باشد، ۲- در هر نقطه پوش میانگین حاصل برای اکسترمم‌ها صفر است. در مقابل تبدیل فوری، توابع مودی ذاتی می‌توانند به صورت نامانا باشند و دامنه آنی وابسته به زمان و فرکانس را داشته باشند. در واقع تابع مودی ذاتی شکل تعمیم یافته یک تابع هارمونیک ساده است. مراحل تعیین توابع مودی ذاتی تحت عنوان پردازش غربالگری^{۱۰} به شرح زیر می‌باشد [۳۶]: ۱- تمامی نقاط ماکزیمم و مینیمم منحنی سیگنال اولیه $x(t)$ به دست می‌آید، ۲- پس از مشخص کردن اکسترمم‌های سیگنال اولیه، تمامی این نقاط به وسیله برازش توان

$$Z(t)=x(t)+iy(t)=A(t)e^{i\theta(t)} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، $Z(t)$ سیگنال تحلیلی، $x(t)$ سیگنال داده‌های زمانی و $y(t)$ تبدیل هیلبرت سیگنال $x(t)$ می‌باشد. دامنه آنی $(A(t))$ و فاز سیگنال تحلیلی $(\theta(t))$ نیز به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(t)=\sqrt{x(t)^2+y(t)^2}, \quad \theta(t)=\arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (5)$$

معادلات θ و A مشخص می‌کند که $x(t)$ یک سیستم قطبی دارد که به حالت دامنه و فاز وابسته می‌باشد. به علاوه فرکانس آنی هم به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega(t)=\frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

۴- روش تعیین خرابی

در این تحقیق تشخیص خرابی بر اساس ماتریس ضرایب همبستگی دامنه‌های حس گره‌های سالم و خراب سازه و تابع همبستگی متقابل دامنه حس گره‌های سالم و خراب در سازه می‌باشد. زمانی که یک سیگنال به مجموعه توابع مودی ذاتی تبدیل می‌شود، اولین تابع مودی ذاتی پاسخ شتاب سازه به عنوان سیگنال اصلی انتخاب می‌شود. از آنجایی که میزان خرابی در پاسخ سازه تأثیر می‌گذارد، هرگونه تغییر بر روی پاسخ اصلی و با توجه به وابستگی سیگنال اصلی به توابع مودی ذاتی، تغییرات ناشی از خرابی به وضوح بر روی توابع مودی ذاتی نمایان می‌شود. همچنین این تغییرات با توجه به تبدیل هیلبرت، سیگنال تحلیلی و دامنه آنی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. پس از استفاده از تبدیل هیلبرت بر روی اولین تابع مودی ذاتی پاسخ‌های دینامیکی سازه، دامنه آنی برای حس گره‌های مختلف بر روی سازه محاسبه می‌شود. با توجه به محاسبه دامنه آنی برای حس گره‌ها، ضریب همبستگی دامنه برای حس گره‌های سالم و خراب محاسبه می‌شود که در نهایت ماتریس ضرایب همبستگی خراب برای حالت‌های سالم و خراب به دست می‌آید. از طریق تعریف پارامتر شاخص خرابی و رسم نمودارهای آن، محل خرابی با

که در آن C_j تعداد n مود ذاتی و r_n باقی مانده می‌باشد.

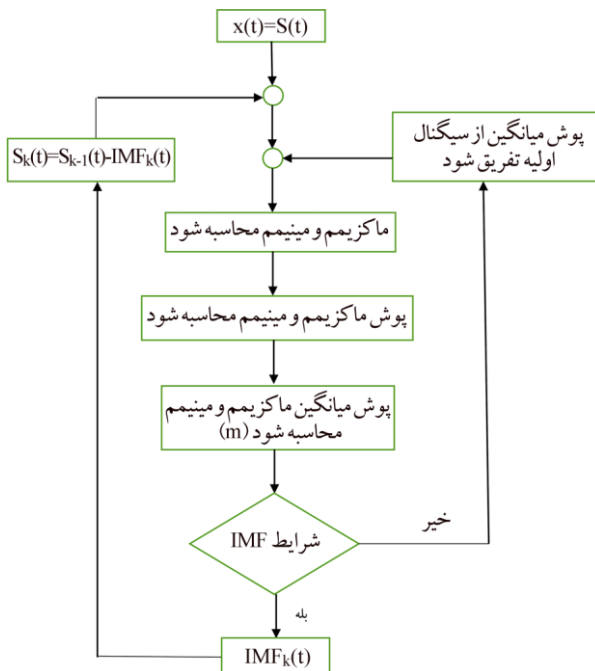
الگوریتم مراحل تعیین تابع مودی ذاتی بر اساس پردازش غربالگری در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳- تبدیل هیلبرت:

با به کار بردن تبدیل هیلبرت بر روی هر تابع مودی ذاتی، داده‌های سری زمانی توابع مودی ذاتی محاسبه می‌شود. تبدیل هیلبرت^{۳۳} HT برای داده‌های زمانی $x(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$HT[x(t)]=y(t)=\frac{1}{\pi} P.V \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3)$$

که در آن $P.V$ قانون مقدار انتگرال کوشی می‌باشد [۳۷]. بنابراین برای یک تابع مودی ذاتی حاصل شده، $C(t) \equiv x(\tau)$ خواهد بود و $y(t)$ تبدیل هیلبرت سیگنال $x(t)$ می‌باشد که سیگنال داده‌های زمانی و پارامتر τ متغیر جزئی از زمان t است که از آن کوچک تر است.



شکل (۱): الگوریتم تعیین توابع مودی ذاتی بر اساس پردازش غربالگری.

تبدیل هیلبرت داده‌های زمانی $x(t)$ به صورت یک زوج مختلط از داده است. سیگنال تحلیلی مختلط به شکل زیر می‌باشد:

سیگنال دیگر اندازه‌گیری می‌کند. برای دو سیگنال پاسخ سازه سالم و خراب همبستگی متقابل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_{hd}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T^{T+\tau} a_h(t) a_d(t+\tau) dt \quad (9)$$

در رابطه (۹)، T زمان رخداد سیگنال و R_{hd} همبستگی متقابل بین دو سیگنال دامنه آنی سازه سالم a_h و خراب a_d می‌باشد. در این حالت نیز دامنه آنی برای همه حس‌گرها محاسبه می‌شود و بر اساس رابطه (۸) همبستگی متقابل برای دامنه آنی همه حس‌گرها به دست می‌آید. سپس سطح زیر منحنی تابع همبستگی متقابل برای همه حس‌گرها محاسبه شده و در نهایت سطح سمت راست و سطح سمت چپ منحنی همبستگی متقابل به دست می‌آید و از طریق پارامتر شاخص خرابی همبستگی متقابل محل خرابی تعیین خواهد شد.

$$S_{R_{hd}(\tau)}(T) = \int_0^T R_{hd} dt, S_{R_{hd}(\tau)}(R) = \int_{\frac{T}{2}}^T R_{hd} dt, S_{R_{hd}(\tau)}(L) = \int_0^{\frac{T}{2}} R_{hd} dt \quad (10)$$

بر اساس رابطه (۱۰)، $S_{R_{hd}(\tau)}(T)$ سطح کل منحنی همبستگی متقابل، $S_{R_{hd}(\tau)}(R)$ سطح سمت راست منحنی همبستگی متقابل و $S_{R_{hd}(\tau)}(L)$ سطح سمت چپ منحنی همبستگی متقابل می‌باشد. همچنین به منظور استفاده صحیح از رابطه (۱۰) و مقیاس‌سازی مناسب آن رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود و در بخش نتایج حاصل از روش تشخیص خرابی با استفاده از تابع همبستگی، تمامی محل خرابی‌ها و بیان آنها از طریق شاخص خرابی همبستگی متقابل $D.I.C.R$ صورت گرفته است. در نهایت پارامتر شاخص $D.I.C.R$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D.I.C.R = \frac{S_{R_{hd}(\tau)}(L) - S_{R_{hd}(\tau)}(R)}{S_{R_{hd}(\tau)}(T)} \quad (11)$$

که در آن شاخص خرابی همبستگی متقابل از اختلاف بین سطوح همبستگی متقابل سمت چپ و راست منحنی نسبت به سطح کل منحنی همبستگی متقابل محاسبه می‌شود. بر این اساس اگر اختلاف بین همبستگی متقابل دو حس‌گر در بازه منفی تا مثبت تغییر کرده باشد، می‌توان محل خرابی را در آن حس‌گرها به دست آورد.

توجه به ضریب همبستگی تعیین می‌شود. همچنین با استفاده از تابع همبستگی متقابل دامنه‌های حس‌گرهای سالم و خراب و مقایسه سطح زیر منحنی آنها محل خرابی تشخیص داده می‌شود.

۵- روش تشخیص خرابی با استفاده از ضریب همبستگی

ضریب همبستگی ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر می‌باشد. همبستگی بین سازه سالم و خراب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho(a_h, a_d) = \frac{\text{cov}(a_h, a_d)}{\sigma_{a_h} \sigma_{a_d}} \quad (7)$$

که در آن، a_h دامنه آنی سازه سالم، a_d دامنه آنی سازه خراب می‌باشد و ρ ضریب همبستگی بین a_h و a_d می‌باشد. همچنین COV کواریانس a_h و a_d است. σ_{a_d} و σ_{a_h} به ترتیب انحراف استاندارد دامنه‌های آنی در حالت سازه سالم و آسیب‌دیده می‌باشد پس از محاسبه دامنه آنی برای حس‌گرها در حالت سازه سالم و خراب، ضریب همبستگی برای همه دامنه‌ها محاسبه می‌شود. سپس خرابی بر روی تیر می‌تواند بر اساس شاخص خرابی همبستگی $D.I.C$ تعیین شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D.I.C = \frac{\rho(a_h, a_h) - \rho(a_d, a_d)}{\rho(a_h, a_h)} \quad (8)$$

بر اساس رابطه (۸) ضرایب همبستگی دامنه آنی حس‌گرها در حالت سالم با هم و در حالت خراب با هم محاسبه می‌شوند و از تقسیم اختلاف بین ضرایب همبستگی دامنه‌های آنی سالم و خراب به ضرایب همبستگی دامنه آنی سالم، شاخص خرابی محاسبه می‌شود. بنابراین $D.I.C$ برای هر خرابی محاسبه می‌شود. در هر حس‌گری که اختلاف ضرایب همبستگی و پارامتر $D.I.C$ بیشتر باشد می‌تواند خرابی در آن حس‌گرها رخ داده باشد.

۶- روش تشخیص خرابی با استفاده از تابع همبستگی متقابل

تابع همبستگی متقابل وابستگی بین مقادیر یک سیگنال را با

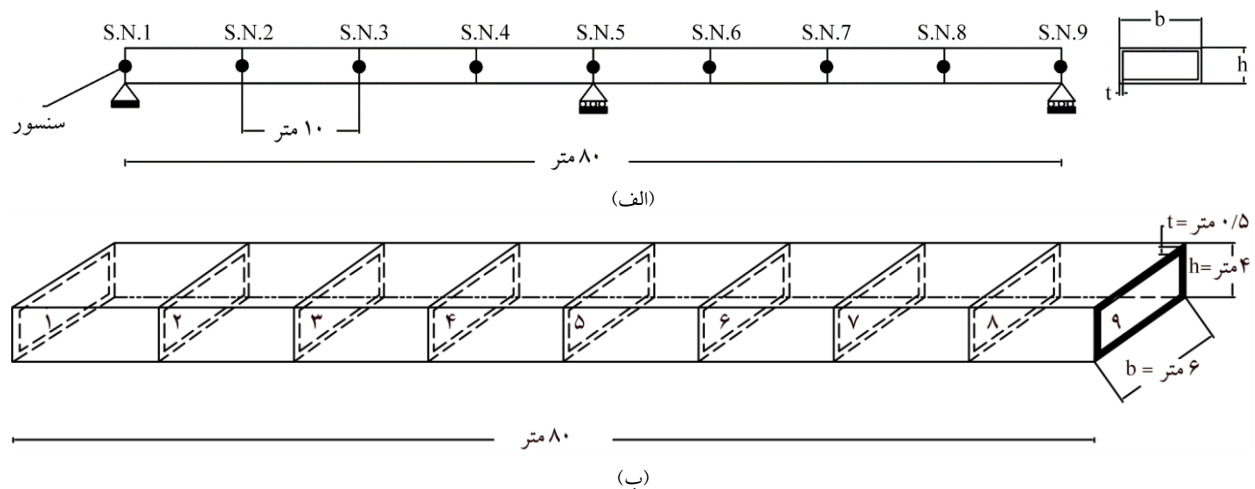
۲- مدل سازی

در مجموع ۲۱ حس گر در طول تیر موجود می باشد. در مقاله [۳۱] نیز از یک تیر سه دهانه با ابعاد کل ۵۰ متر استفاده شده است که در فواصل ۵ متری حس گر گذاری انجام شده و در مجموع دارای ۱۰ حس گر می باشد. در پل پوتلیتز واقع در شهر برلین آلمان که یک نمونه واقعی از پایش سلامت سازه می باشد به طور میانگین ۲۱ عدد حس گر برای دهانه ۲۷۰ متری استفاده شده است که این حس گر ها تقریباً در فواصل ۱۲ متری می باشد [۳۹]. نمونه دیگر پل وشتند واقع در شهر برلین آلمان است که آن هم یک نمونه واقعی از پایش سلامت پل ها می باشد که طول این پل ۲۴۳ متر و در فواصل ۷ متری حس گر گذاری صورت گرفته است که تقریباً دارای ۳۶ حس گر می باشد [۳۹]. بنابراین با توجه به موارد بیان شده، در این تحقیق بر اساس میانگین می توان در فواصل ۱۰ متری از تیر بتنی حس گر گذاری انجام داد که در مجموع ۹ حس گر بر روی تیر بتنی انتخاب می شوند.

برای دریافت پاسخ های دینامیکی در هر حس گر یک بار ضربه مثلثی که مشخصات آن در شکل (۳) نشان داده شده است به نقطه ۷ در تیر بتنی وارد شده است. با توجه به دریافت پاسخ های دینامیکی خصوصاً شتاب، به نظر می رسد که بار گذاری پالس مثلثی که به صورت آنی در یک نقطه وارد شود می تواند تحریک مناسبی برای تیر باشد. اما به صورت کلی مدل های مختلف بار گذاری را می توان به کار گرفت که در این

برای ارزیابی و بررسی روش تشخیص خرابی ارائه شده بر اساس تبدیل هیلبرت- هوانگ یک مدل تیر دو دهانه بتنی استفاده شده است. طول این تیر ۸۰ متر و هر دهانه آن ۴۰ متر می باشد. لایه فوقانی تیر به وسیله بتنی با ضخامت ۵۰ سانتی متر پوشانده شده است. بر اساس شکل (۲-ب) هر تکه بتنی دارای ۴ متر ارتفاع ($h=4m$) و ۶ متر عرض ($b=6m$) می باشد. هدف اصلی در انتخاب ابعاد تکه های بتنی نزدیک تر بودن مدل سازی به نمونه های واقعی تر است. مدل المان محدود تیر بتنی دو دهانه به منظور ارزیابی روش ارائه شده، در برنامه SAP2000 مدل سازی شده که المان به کار رفته برای مدل سازی مقاطع بتنی از نوع Shell است.

در شکل (۲) نمای روبرو و نمای سه بعدی تیر بتنی دو دهانه مشاهده می شود. هر المان از تیر بتنی برای دریافت پاسخ های دینامیکی نام گذاری شده است که در مجموع ۹ حس گر در تیر بتنی به فاصله ۱۰ متر از یکدیگر به صورت S.N. نام گذاری شده است. بدیهی است هر چه تعداد حس گر ها بیشتر باشد جواب ها بهتر خواهند شد و یا اگر تعداد حس گر ها کم شود جواب های مطلوبی حاصل نمی شود. اما به منظور انتخاب تعداد حس گر های روی تیر بتنی می توان به بررسی دیگر مقالات و پروژه های واقعی پرداخت. برای نمونه در مقاله [۳۸] از یک تیر با طول ۲۰ متر استفاده شده و در فواصل ۱ متری حس گر گذاری انجام پذیرفته که



شکل (۲): نمای تیر بتنی دو دهانه (الف) نمای روبرو (ب) نمای سه بعدی.

نزدیک حس گر چهار می‌باشد که کل المان موجود بین حس گرهای مذکور دارای خرابی D1 می‌باشند که عرض آن ۱/۲۵ متر است و محل حس گرها در شکل (۴) مشخص می‌باشد. سناریوی دوم D2 با مقدار خرابی ۹۰ درصد نزدیک به حس گر چهار می‌باشد که عرض آن نیز ۱/۲۵ متر می‌باشد. سناریوهای خرابی بیان شده تنها در میزان خرابی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. در جدول (۱) مشخصات سناریوهای خرابی بیان شده و در شکل (۴) محل سناریوهای خرابی نشان داده شده است.

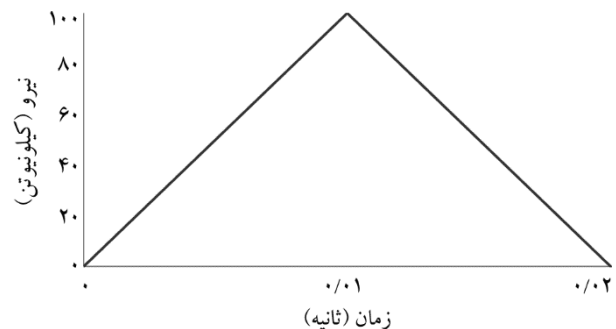
جدول (۱): سناریوهای خرابی، محل خرابی و مقدار آن.

سناریو خرابی	محل خرابی (m)	مقدار خرابی (%)
D1	۲۸/۷۵	۲۰
D2	۲۸/۷۵	۹۰

۸- نتایج عددی

برای پردازش پاسخ‌های دینامیکی سازه بر اساس روش تبدیل هیلبرت- هوانگ، پاسخ همه حس گرها با استفاده از تحلیل عددی محاسبه شده است. به منظور پردازش پاسخ‌های به دست آمده و مراحل تشخیص خرابی از برنامه MATLAB استفاده شده است. توابع مودی ذاتی (IMF) همه حس گرها با استفاده از تجزیه مودی تجربی (EMD) به دست آمده و با تبدیل هیلبرت ترکیب شده است. در شکل (۵) سه تابع مودی ذاتی اول حس گر شماره چهار در حالت سالم رسم شده است. از ترکیب توابع مودی ذاتی با تبدیل هیلبرت، مقادیر فرکانس و دامنه آنی هیلبرت به دست آمده است. بنابراین دامنه آنی برای همه حس گرها محاسبه می‌شود. برای نمونه دامنه آنی

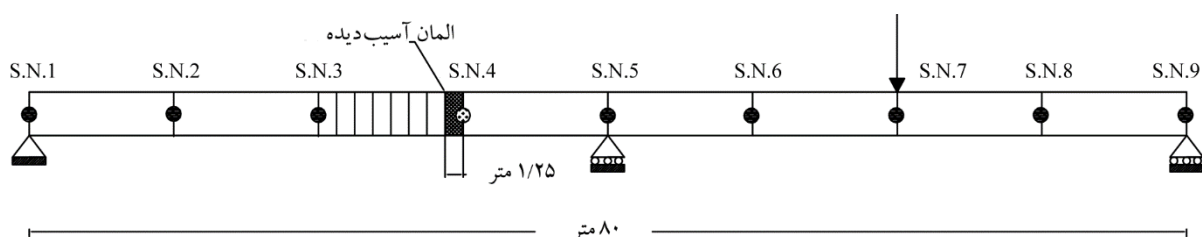
تحقیق هدف بررسی بار ضربه بوده به همین خاطر بار دینامیکی ضربه‌ای به صورت ساده مثلثی مدل شده است. همچنین در تحقیقات گسترده‌ای از بارهای ضربه‌ای خصوصاً مثلثی استفاده شده که در ادبیات فنی [۲۷-۲۸، ۴۰-۴۱] بدان اشاره گردیده است. مکان‌های مختلفی نیز برای اعمال بار ضربه در نقاط مختلف روی تیر بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. اما به دلیل اینکه در این نمونه هدف بررسی دهانه دوم بوده محل بار بر روی نقطه ۷ وارد شده است تا همبستگی میان حس گرهای دهانه دوم و محل اعمال ضربه در آن بررسی گردد. منظور از حس گرها، دریافت پاسخ‌های دینامیکی از نقاط نام گذاری شده می‌باشد که به عنوان حس گر نامیده شده است.



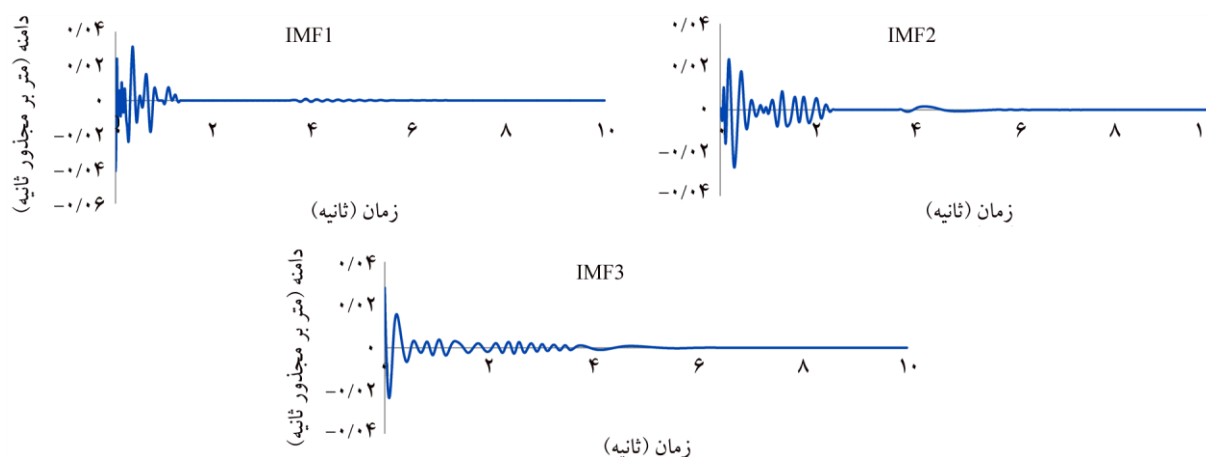
شکل (۳): مشخصات بارگذاری مثلثی ضربه وارد به نقطه ۷.

به منظور ارزیابی روش تبدیل هیلبرت- هوانگ نیاز به پاسخ‌های خرابی تیر بتنی برای تعیین محل خرابی با استفاده از مقایسه نتایج پاسخ‌های دینامیکی سالم و خراب می‌باشد. به همین خاطر از دو سناریو خرابی که دارای مقدار و محل خرابی متفاوت می‌باشند استفاده شده است.

خرابی ایجاد شده به وسیله کاهش سختی در یک المان مشخص تیر می‌باشد و به صورت سختی خمشی در کل تیر نمایان شده است. سناریوی اول D1 که با مقدار ۲۰ درصد خرابی



شکل (۴): محل سناریوهای خرابی بر روی تیر بتنی.



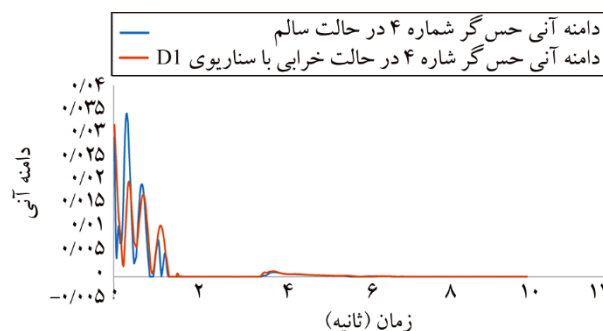
شکل (۵): سه تابع مودی ذاتی اول سنسور شماره ۴ در حالت سالم.

همبستگی و مقایسه نمودارهای حس گرهای سالم و خراب، محل خرابی در تیر تعیین شده است. در شکل‌های زیر نتایج حاصل برای سناریوهای مختلف خرابی بر اساس پارامتر شاخص خرابی همبستگی D.I.C برای همه حس گرها رسم شده است.

با توجه به اینکه ضربه در بخش دهانه دوم تیر خمشی وارد شده و به صورت کلی بررسی حس گرهای موجود در همان دهانه‌ای که بار به آن وارد شده پرداخته شده و همچنین در این مقاله هدف این بوده دهانه دوم به عنوان یک نمونه انتخاب گردد و بحث و بررسی در همان دهانه انجام شود، به همین خاطر حس گرهای در محل ضربه اعمالی، حس گرهای ۶، ۷ و ۸ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از طرفی می‌توان هدف دوم را بررسی همبستگی و ارتباط میان محل ضربه وارد شده و حس گرهایی که مجاور آن هستند نام برد.

شکل (۷) شاخص خرابی همبستگی در حالت سناریوی D1 را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه حس گرهای ۱، ۵ و ۹ در محل تکیه‌گاه‌ها هستند، مقدار آنها صفر می‌باشد. همچنین ضریب همبستگی هر حس گر با خودش یک می‌باشد با توجه به اختلاف حس گرهای سالم و خراب این مقادیر صفر شده است. در شکل (۷) اختلاف شاخص خرابی همبستگی میان حس گرهای ۳ و ۴ در حس گرهای ۶، ۷ و ۸ به وضوح مشخص است که به دلیل وجود خرابی و تغییراتی است که بین حس گرهای ۳ و ۴ ایجاد شده است. با توجه به سناریوی D1 محل خرابی در بین حس گرهای ۳ و ۴

اولین تابع مودی ذاتی حس گر شماره چهار در هر دو حالت سالم و خرابی با سناریوی D1 در شکل ۶ رسم شده است:

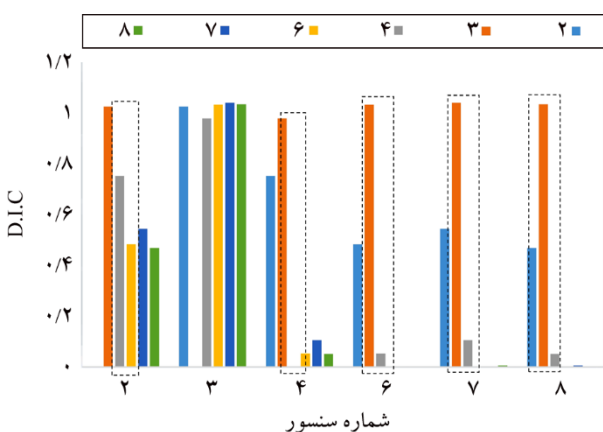


شکل (۶): دامنه آنی اولین تابع مودی ذاتی حس گر شماره ۴ در حالت سالم و سناریو خرابی D1.

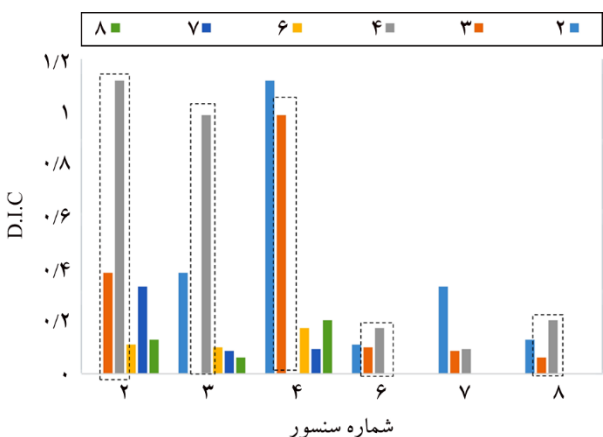
۹- تشخیص خرابی با استفاده از ضرایب همبستگی دامنه آنی هیلبرت

پس از محاسبه دامنه آنی برای هر حس گر ضریب همبستگی دامنه‌های آنی محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه ضریب همبستگی وسیله‌ای برای تعیین رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر است بنابراین از این پارامتر آماری برای تعیین محل خرابی بر روی تیر استفاده شده است. همبستگی نقاط دامنه سالم با هم و همبستگی نقاط دامنه خرابی با هم محاسبه می‌شود و در نهایت بر اساس تعداد حس گرها ماتریسی 6×6 تشکیل می‌شود که متشکل از ضرایب همبستگی برای حس گرهای مختلف می‌باشد. بر اساس ضرایب

می‌باشد که این اختلاف به دلیل وجود تغییراتی در بین حس گر ۳ و ۴ است و ناشی از خرابی حاصل در سناریوی D1 می‌باشد. پس با توجه به این اختلاف در بین حس گره‌های ۳ و ۴ در حالت پاسخ‌های دارای نوفه نیز محل خرابی مشخص شده است. با توجه به شاخص خرابی همبستگی محاسبه شده برای سناریوی خرابی D2 همراه با نوفه ۲ درصد در شکل (۱۰)، اختلاف واضحی بین حس گره‌های ۳ و ۴ در اکثر حس گرها مشخص است که ناشی از تغییرات سناریوی خرابی D2 است و محل خرابی بین حس گره‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. بیشترین اختلاف پارامتر D.I.C در بین حس گره‌های ۳ و ۴ در حس گر ۴ رخ داده است. در این حالت نیز محل خرابی سناریوی D2 تعیین گردید.

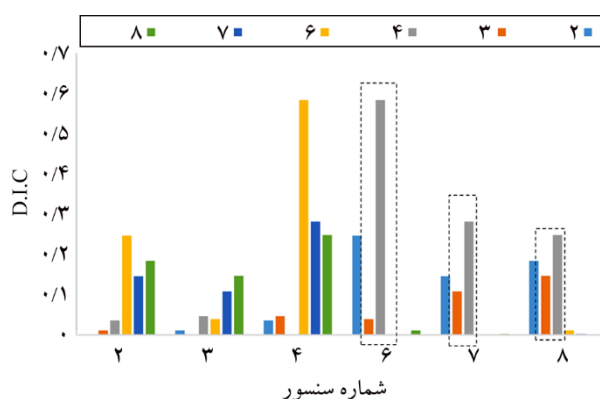


شکل (۹): شاخص خرابی همبستگی D.I.C برای سناریو خرابی D1 همراه با نوفه ۲ درصد.

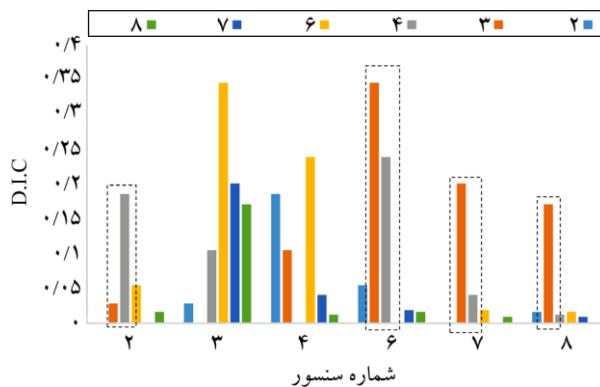


شکل (۱۰): شاخص خرابی همبستگی D.I.C برای سناریو خرابی D2 همراه با نوفه ۲ درصد.

مشخص است. بر اساس شکل (۸) شاخص خرابی همبستگی در حالت سناریوی D2 هم اختلاف بین ماتریس خرابی همبستگی بین حس گره‌های ۳ و ۴ در همه حس گره‌های دیگر مشخص می‌باشد، که اختلاف موجود بر اساس خرابی سناریوی D2 است و به همین خاطر محل خرابی که نزدیک حس گر ۴ بوده را به شکل تغییرات شاخص خرابی همبستگی در بین حس گر ۳ و ۴ نشان می‌دهد.



شکل (۷): شاخص خرابی همبستگی D.I.C برای سناریو.

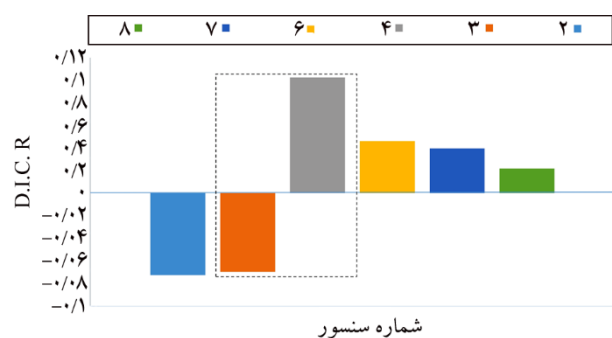


شکل (۸): شاخص خرابی همبستگی D.I.C برای سناریو خرابی.

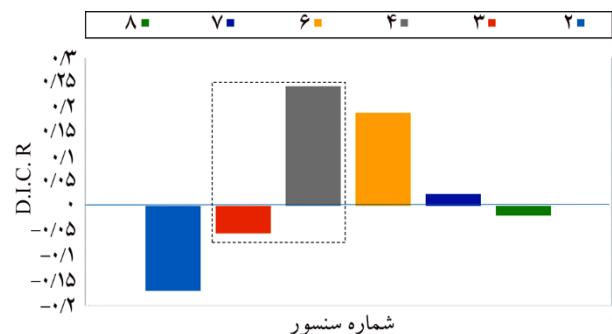
با توجه به اینکه معمولاً در سیگنال‌های پاسخ، نوفه‌هایی به دلایل مختلف اندازه‌گیری وجود دارد به همین خاطر به پاسخ‌های دینامیکی تیر در سناریوهای مختلف خرابی نوفه ۲ درصد اضافه شده است و تشخیص خرابی برای حالت‌های مختلف خرابی همراه نوفه محاسبه شده است. بر اساس شکل ۹ شاخص خرابی همبستگی D.I.C برای سناریو خرابی D1 همراه با نوفه ۲٪ محاسبه شده است. در هر حس گر ضرایب همبستگی بین حس گر ۳ و ۴ دارای اختلاف

۱۰- تشخیص خرابی با استفاده از تابع همبستگی متقابل دامنه آنی هیلبرت

همان‌طور که توضیح داده شد در این بخش با استفاده از پارامتر شاخص خرابی همبستگی متقابل D.I.C.R محل خرابی برای سناریوهای مختلف خرابی تعیین می‌شود. پس از محاسبه دامنه همه حس گرها ماتریس خرابی همبستگی متقابل برای همه دامنه‌ها محاسبه می‌شود. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نتایج برای سناریوهای مختلف خرابی رسم شده است:



شکل (۱۱): شاخص خرابی همبستگی D.I.C.R برای سناریو.



شکل (۱۲): شاخص خرابی همبستگی D.I.C.R برای سناریو خرابی.

خرابی همبستگی متقابل محل خرابی را به خوبی نشان می‌دهد. در شکل (۱۲) با توجه به سناریوی خرابی D2 محل خرابی بین حس گر ۳ و ۴ می‌باشد. بر اساس پارامتر D.I.C.R اختلاف بین حس گر ۳ و ۴ از ناحیه مقادیر منفی به مثبت مشخص می‌باشد و خرابی حاصل از سناریوی D2 به صورت تغییرات شاخص همبستگی متقابل در حس گر ۳ و ۴ نمایان شده است. همچنین این تغییرات در بین حس گر ۷ و ۸ نیز وجود دارد اما اختلاف حاصل در حس گرهای ۳ و ۴ از حس گرهای ۷ و ۸ بیشتر است. بنابراین محل خرابی بین حس گرهای ۳ و ۴ می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل در شکل‌های (۷) تا (۱۲) روش ارائه شده می‌تواند تغییرات بین دو حس گر را در شاخص خرابی نشان دهد و اگر خرابی در محل دیگری برای مثال در فاصله ۱۵ متری از تکیه‌گاه میانی (در وسط فاصله بین حس گر ۳ و ۴) باشد، روش ارائه شده به تنهایی نمی‌تواند محل دقیق را نشان دهد. در صورت یابی به نتایج بهتر نیازمند این هست که در بین فاصله حس گر ۳ تا ۴ تعداد حس گرها را افزایش داد و المان‌ها را کوچک‌تر کرد تا دقت شاخص خرابی برای تعیین محل خرابی بهتر شود.

تیر مدل‌سازی شده در مقاله یک تیر دو دهانه است و محل لنگر حداکثر در روی تکیه‌گاه می‌باشد و لنگر مثبت هم وسط دهانه نیست. اصولاً روش‌های تشخیص خرابی مبتنی بر پاسخ جابه‌جایی، خرابی را در مکان‌هایی که دامنه پاسخ بیشتر است، بهتر تشخیص می‌دهند و اگر محل خرابی در وسط فرض می‌شد، این شبهه پیش می‌آید که اگر خرابی در نقاطی دیگر به وجود می‌آمد آیا روش قادر به تشخیص می‌بود؟ همچنین در مقاله [۳۱ و ۳۸] نیز محل‌های خرابی در محل یک‌چهارم ابتدا و انتهای تیر و در مقاله [۴۲] محل خرابی در یک‌سوم و یک‌چهارم ابتدایی تیر در نظر گرفته شده است که در محل لنگر حداکثر نیست. به نظر می‌رسد لزوماً خرابی بر اثر لنگر حداکثر نیست و محل‌هایی مانند محل وصله تیر ورق یا جوشکاری، و همچنین اثرات خوردگی، ترک و یا برخورد وسایل نقلیه دیگر، زیرگذر و ... نیز مؤثر می‌باشند به هر صورت در سناریوی خرابی که خرابی در وسط باشد روش با دقت بیشتری قادر به تشخیص می‌باشد. همچنین

مقادیر پارامتر D.I.C.R برای سناریوی خرابی D1 در حس گرهای ۲ و ۳ مقداری منفی است و برای حس گرهای ۴، ۶، ۷ و ۸ مقداری مثبت می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است عبور از ناحیه منفی به مثبت در بین حس گرهای ۳ و ۴ رخ داده است. با توجه به سناریوی D1 که خرابی در بین حس گرهای ۳ و ۴ است، بر اساس اختلاف موجود در پارامتر D.I.C.R برای حس گرهای ۳ و ۴، محل خرابی در بین حس گرهای ۳ و ۴ مشخص می‌باشد. بنابراین تغییرات شاخص

به دست آمدند. در حالت تشخیص خرابی بر اساس شاخص خرابی همبستگی متقابل D.I.C.R، محل خرابی برای همان سناریوهای خرابی به دست آمد. در این حالت نیز محل خرابی با استفاده از مقایسه سطح زیر نمودار تابع همبستگی متقابل برای خرابی‌های متفاوت تعیین شد. به دلیل تغییرات تابع همبستگی متقابل ناشی از سناریوی مختلف خرابی، این خرابی‌ها به‌طور مشخص در حس گرهای ۳ و ۴ نمایان شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که پردازش سیگنال پاسخ‌های سازه با استفاده از تبدیل هیلبرت- هوانگ و ترکیب آن با روش‌های تحلیلی آماری می‌تواند محل خرابی در سازه را با دقت مناسبی تعیین کند. تحقیق مذکور روش تحلیلی است که محل خرابی در مدل تحلیلی به‌عمد به وجود آمده و در یک روش مهندسی معکوس هدف قابلیت ارزیابی روش پیشنهادی در تشخیص خرابی مورد نظر است. بنابراین مثال ارائه شده در واقع راستی‌آزمایی روش پیشنهادی است که در مدل تحلیلی مشخص شده است که روش مذکور قادر به تشخیص خرابی موجود در مدل تحلیلی می‌باشد. همچنین برای مقایسه قابلیت دقت و کارایی روش پیشنهادی با روش‌های دیگر، روش تبدیل هیلبرت- هوانگ با روش تشخیص خرابی موجک در مقاله‌های [۴۳-۴۵] مقایسه گردیده است. اما روش ارائه شده دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که بیشترین محدودیت‌های روش ارائه شده به دلایل ذاتی خود روش است. برای مثال تأثیر شدت خرابی و عدم تعیین خرابی‌های چندگانه از جمله محدودیت‌های ذاتی روش ارائه شده می‌باشد. همچنین مواردی از قبیل تأثیر بارگذاری‌های مختلف بر روی روش و نحوه انتخاب حس گرها و تعداد آنها نیز به علت تکمیل نشدن تحقیقات است که این موارد در حال تحقیق و بررسی می‌باشد.

مراجع

1. Khosraviani, M.J. and Ghasemi, M. (2016) Output-only damage detection in beam structures using statistical analysis of Hilbert-Huang Transformation of measured response. *Proceeding of 8th European Workshop on Structural Health Monitoring*,

اگر در حالات قبل تغییر بر روی پاسخ اصلی سازه به دلیل آسیب دیدگی و خرابی در حس گر باشد و نه به دلیل تغییرات ناشی از خرابی، شاید بتوان تغییرات را از روی نتایج دو حس گر مجاور هم پی برد اما در این مقاله در زمینه احتمال خرابی حس گرها و قابلیت اعتماد پاسخ‌ها تحقیقی صورت نگرفته است که این موضوع در ادامه تحقیق قابل بررسی است.

۱۱- نتیجه‌گیری

تعیین محل خرابی در سازه‌ها می‌تواند شرایط ایمنی آنها را تحت بارهای مختلف فراهم کند. در دهه‌های اخیر روش‌های متفاوتی بر اساس ارتعاشات سازه برای تعیین خرابی در سازه‌ها ارائه شده است. با این وجود هنوز برخی از این روش‌ها به خرابی‌های اندک حساس نیستند. از این‌رو در مقاله حاضر یک روش جدید تشخیص محل خرابی با استفاده از تبدیل هیلبرت- هوانگ پاسخ‌های سازه ارائه شد. به همین منظور یک تیر ساده بتنی دو دهانه مدل‌سازی شد و در حالت بارگذاری دینامیکی به تعیین محل خرابی با استفاده از روش تجزیه مودی تجربی و دامنه آنی هیلبرت پرداخته شد. در ابتدا با استفاده از پردازش تجزیه مودی تجربی، توابع مودی ذاتی پاسخ‌های تیر در نقاط مختلف محاسبه شدند و پس از ترکیب با تبدیل هیلبرت مقادیر دامنه آنی هیلبرت به دست آمدند. با استفاده از دامنه آنی هیلبرت و ترکیب آن با پارامترهای آماری از قبیل ضریب همبستگی و تابع همبستگی متقابل به تعیین محل خرابی پرداخته شد. بر اساس نتایج در حالت تشخیص خرابی بر اساس شاخص خرابی همبستگی D.I.C، محل خرابی در دو سناریوی مختلف خرابی D1 و D2 به دست آمد. در حالت سناریوی D1 و D2 اثرات خرابی موجود در حس گرهای ۳ و ۴ به‌خوبی در حس گرهای دیگر با استفاده از تغییر ضرایب همبستگی ایجاد شده بود و محل خرابی با توجه به تغییرات ضرایب همبستگی در حس گرهای ۳ و ۴ مشخص بود. همچنین برای در نظر گرفتن نوفه‌های اندازه‌گیری مقدار ۲ درصد نوفه به پاسخ‌های دینامیکی اضافه شد و محل خرابی برای سناریوهای مختلف خرابی D1 و D2 با استفاده از تغییرات ضرایب همبستگی

- Infrastructure Engineering*, **18**(5), 339-355.
13. Mallat, S. (1999) *A Wavelet tour of Signal Processing*. Academic press.
 14. Piombo, B.A.D., Fasana, A., Marchesiello, S. and Ruzzene, M. (2000) Modelling and identification of the dynamic response of a supported bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **14**(1), 75-89.
 15. Lee, J.W., Kim, J.D., Yun, C.B., Yi, J.H. and Shim, J.M. (2002) Health-monitoring method for bridges under ordinary traffic loadings. *Journal of Sound and Vibration*, **257**(2), 247-264.
 16. Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C. and Liu, H.H. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **454**(1971), 903-995, The Royal Society.
 17. Donnelly, D. and Rogers, E. (2009) Time series analysis with the Hilbert–Huang transform. *American Journal of Physics*, **77**(12), 1154-1161.
 18. Yang, J.N., Lei, Y., Pan, S. and Huang, N. (2003) System identification of linear structures based on Hilbert–Huang spectral analysis. Part 1: normal modes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **32**(9), 1443-146.
 19. Wu, S.P., Qin, G.J., Zou, J.H. and Sun, H. (2009) Structure health monitoring based on HHT of vibration response from unknown excitation. *Proceedings of the 8th International Symposium on Test and Measurement*, **6**(1), 490–493.
 20. Quek, S.T., Tua, P.S. and Wang, Q. (2003) Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. *Smart Materials and Structures*, **12**(3), 447.
 21. Cheraghi, N. and Taheri, F. (2007) A damage index for structural health monitoring based on the empirical mode decomposition. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, **2**(1), 43-61.
 22. Musafere, F., Sadhu, A. and Liu, K. (2016) Time-EWSHM 2016. Bilbao, Spain.
 2. Knitter-Piatkowska, A., Garbowski, T. and Garstecki, A. (2012) Damage detection through wavelet transform and inverse analysis. *Proceeding of 8th European Conf. on Solid Mechanics, ESMC 2012*. Graz, Austria.
 3. Hou, Z., Noori, M. and Amand, R.S. (2000) Wavelet-based approach for structural damage detection. *Journal of Engineering Mechanics*, **126**(7), 677-683.
 4. Han, J., Zheng, P. and Wang, H. (2014) Structural modal parameter identification and damage diagnosis based on Hilbert-Huang transform. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **13**(1), 101-111.
 5. Farrar, C.R. and Jauregui, D.A. (1998) Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: II. Numerical study. *Smart Materials and Structures*, **7**, 720.
 6. Vestroni, F. and Stefano, V. (2008) *Damage Detection with Auxiliary Subsystems*. Springer Vienna.
 7. Littler, J.D. and Ellis, B.R. (1995) Measuring the dynamic characteristics of prototype structures. *A State of the Art in Wind Engineering*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 133-154.
 8. Melhem, H. and Kim, H. (2003) Damage detection in concrete by Fourier and wavelet analyses. *Journal of Engineering Mechanics*, **129**(5), 571-577.
 9. Nag, A., Mahapatra, D.R. and Gopalakrishnan, S. (2002) Identification of delamination in a composite beam using a damaged spectral element. *Structural Health Monitoring*, **1**(1), 105-126.
 10. Lee, B. C. and Staszewski, W. J. (2003) Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation. *Smart Materials and Structures*, **12**(5), 804.
 11. Staszewski, W.J. (1998) Structural and mechanical damage detection using wavelets. *The Shock and Vibration Digest*, **30**(6), 457-472.
 12. Kijewski, T. and Kareem, A. (2003) Wavelet transforms for system identification in civil engineering. *Computer-Aided Civil and*

- Using Hilbert-Huang Transformation. *Topics in Modal Analysis*, **7**, 439-450, Springer New York.
32. Razi, P. and Taheri, F. (2014) A vibration-based strategy for health monitoring of offshore pipelines' girth-welds. *Sensors*, **14**(9), 17174-17191.
33. Michael, B., Sullivan, R.W., Samarantunga, D. and Jha, R. (2015) Vibration Response and Damage Detection of Carbon/Epoxy Beams at Elevated Temperatures using the Hilbert-Huang Transform, (No. 2015-01-2586). SAE Technical Paper.
34. Reddy, D.M. and Krishna, P. (2015) Innovative method of empirical mode decomposition as spatial tool for structural damage identification. *Structural Control and Health Monitoring*, **22**(2), 365-373.
35. Quek, S.T., Tua, P.S. and Wang, Q. (2005) Comparison of Hilbert-Huang, wavelet, and Fourier transforms for selected applications. *The Hilbert-Huang Transform in Engineering*, 213-244.
36. Huang, W., Shen, Z., Huang, N.E. and Fung, Y.C. (1999) Nonlinear indicial response of complex nonstationary oscillations as pulmonary hypertension responding to step hypoxia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **96**(5), 1834-1839.
37. Oliveira, P.M. and Barroso, V. (1998) Instantaneous frequency of mono and multicomponent signals. *Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on IEEE*, 105-108.
38. Zonta, D., Lanaro, A. and Zanon, P. (2003) A strain-flexibility-based approach to damage location. In *Key Engineering Materials*, **245**, 87-96, Trans Tech Publications.
39. Wenzel, H. (2008) *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons.
40. Laflamme, S., Cao, L., Chatzi, E. and Ubertini, F. (2016) Damage detection and localization from dense network of strain sensors. *Shock and Vibration*.
41. Iatridis, J.C., MacLean, J.J. and Ryan, D. (2005) Mechanical damage to the intervertebral disc annulus fibrosus subjected to tensile loading. Varying System Identification Using a Hybrid Blind Source Separation Method. *Structural Health Monitoring, Damage Detection & Mechatronics*, **7**, 99-104, Springer International Publishing.
23. WenQin, H., Ying, L., AiJun, G. and Yuan, F.G. (2016) Damage Modes Recognition and Hilbert-Huang Transform Analyses of CFRP Laminates Utilizing Acoustic Emission Technique. *Applied Composite Materials*, **23**(2), 155-178.
24. Ghodrati Amiri, G., Talebzadeh, M., Talebi, M. and Tabrizian, Z. (2016) Damage assessment in connection of moment resistant frames using Hilbert-Huang Transform. *Sharif Journal Civil Engineering*, **32.2**(1.1), 3-11.
25. Zhang, Y., Lian, J. and Liu, F. (2016) An improved filtering method based on EEMD and wavelet-threshold for modal parameter identification of hydraulic structure. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **68**, 316-329.
26. Khosraviani, M.J. and Ghasemi, M. (2016) Damage localization in beam-like structure under moving load by Empirical Mode Decomposition, *Life-Cycle of Engineering Systems*, CRC Press, Netherland, 291-296.
27. Wang, Z.P. and Sun, C.T. (2002) Modeling micro-inertia in heterogeneous materials under dynamic loading. *Wave Motion*, **36**(4), 473-485.
28. Upadhyay, A.K., Pandey, R. and Shukla, K.K. (2011) Nonlinear dynamic response of laminated composite plates subjected to pulse loading. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **16**(11), 4530-4544.
29. Chen, B. and Xu, Y.L. (2005) A new damage index for detecting sudden stiffness reduction. Special session paper, *Proc. 1st International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement*, Perth, Western Australia, 63-70.
30. Cheraghi, N. and Taheri, F. (2008) Application of the empirical mode decomposition for system identification and structural health monitoring, **2**(1), 61-7.
31. Zarafshan, A. and Ansari, F. (2014) Damage Index Matrix: A Novel Damage Identification Method

Journal of Biomechanics, **38**(3), 557-565.

42. Yazdanpanah, O. and Seyedpoor, S.M. (2013) A crack localization method for beams via an efficient static data based indicator. *Computational Methods in Civil Engineering*, **4**(1), 43-63.
43. Li, H., Deng, X. and Dai, H. (2007) Structural damage detection using the combination method of EMD and wavelet analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(1), 298-306.
44. Chen, B. and Xu, Y.L. (2007) A new damage index for detecting sudden change of structural stiffness. *Structural Engineering and Mechanics*, **26**(3), 315-341.
45. Lin, L. and Chu, F. (2012) HHT-based AE characteristics of natural fatigue cracks in rotating shafts. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **26**, 181-189.

واژه‌نامه

- ۱- تبدیل سریع فوریه Fast Fourier Transform (FFT)
- ۲- تبدیل زمان کوتاه فوریه Short Time Fourier Transform (STFT)
- ۳- تبدیل موجک Wavelet Transform
- ۴- جداسازی کور Blind Separation
- ۵- الگوریتم تشخیص سیستم‌های ویژه Eigensystem Realization Algorithm (ERA)
- ۶- آنتروپی تنها Singular Entropy
- ۷- تجزیه مودی تجربی Empirical Mode Decomposition (EMD)
- ۸- تابع مودی ذاتی Intrinsic Mode Function (IMF)
- ۹- محل‌های قطع محور افقی Zero Crossing
- ۱۰- پردازش غریالگری Sifting Process
- ۱۱- سیگنال‌های سوار Riding Waves
- ۱۲- برازش درجه سوم نوار باریک Cubic Spline Fitting
- ۱۳- تبدیل هیلبرت Hilbert Transform (HT)
- ۱۴- شاخص خرابی همبستگی Damage Index Correlation (DIC)
- ۱۵- شاخص خرابی همبستگی متقابل Damage Index Cross Correlation (DICR)

متقابل