

الگوریتم توسعه یافته شناسایی آسیب با استفاده از پاسخ دینامیکی جابه جایی عرشه پل ها تحت بار عبوری

سروش روستازاده^۱، فرهاد دانشجو^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، گروه مهندسی سازه، دانشگاه تربیت مدرس
۲. استاد گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*da_fa@modares.ac.ir nesh

تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱۸

چکیده

با توجه به نقش حیاتی پل ها در شبکه حمل و نقل کشورها و همچنین تاثیر زیاد آن در اقتصاد و زندگی روزمره یک جامعه، حفظ خدمت دهی آن ها از اهمیت فوق العاده برخوردار است. از این رو ارائه روشی قابل اعتماد که بتوان به وسیله آن سلامت سازه ای پل ها را کنترل و آسیب های احتمالی را شناسایی نمود، ضروری می نماید. بیشتر روش هایی که در این زمینه ارائه شده است مبتنی بر مقایسه پاسخ سازه در حالت سالم و آسیب دیده است و از آن جا که در عمل شرایط حالت سالم سازه در دست نیست این روش ها کاربرد عملی چندانی ندارند. در این پژوهش روشی که بدون نیاز به پاسخ سازه در حالت سالم قادر به شناسایی آسیب باشد بررسی شد. در این روش پاسخ جابه جایی دینامیکی وسط دهانه یک عرشه دو سر ساده به یک مولفه دینامیکی و یک مولفه شبه استاتیکی تجزیه می شود. به کمک قضیه بتی - ماکسول می توان مولفه شبه استاتیکی حاصل را به تغییر شکل استاتیکی عرشه تحت یک بار استاتیکی نسبت داد و با توجه به رابطه انحنا تغییر شکل، سختی خمشی و لنگر خمشی، وجود و محل آسیب (کاهش سختی) را شناسایی نمود. این روش صرفا در یک تیر دوسر ساده و بنا بر حاکمیت فقط یک مود بر پاسخ سازه آزمایش شده بود. در این پژوهش با تجزیه پاسخ به کمک روش تجزیه تجربی مود (EMD)، ضمن عمومیت بخشیدن به کاربرد این روش در پل ها (که پاسخ آن ها لزوما متاثر از یک مود نیستند) امکان جداسازی نویز محیطی با روش EMD از پاسخ اصلی نیز فراهم می شود. به علاوه، در روش اولیه بدلیل تغییرات لنگر در طول تیر اول اینکه آسیب در وسط دهانه قابل شناسایی نیست، دوم تغییرات انحنا تغییر شکل را لزوما نمی توان به وجود آسیب نسبت داد. در این پژوهش با ایجاد یک ناحیه مجازی با لنگر ثابت به کمک اصل جمع آثار قوا ضمن افزایش دقت و بهبود نتایج، هرگونه افزایش موضعی انحنا در نمودار تغییر شکل را می توان منتجه آسیب دانست. کاربرد روش پیشنهادی در سناریوهای مختلفی از آسیب در یک تیر دو سر ساده بررسی، و آسیب در هر سناریو با موفقیت شناسایی شد. کارایی روش پیشنهادی در مدل یک پل پنج دهانه واقعی ارزیابی شد. روش پیشنهادی با موفقیت قادر به شناسایی موقعیت طولی آسیب در آن پل است.

واژگان کلیدی: تشخیص خسارت، پایش سلامت، پردازش سیگنال، تجزیه تجربی مودی.

۱. مقدمه

پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. این موضوع بعد از فروریزش پل سیلور کریک در سال ۱۹۶۷ توجه زیادی را به خود معطوف کرد تا جایی که کنگره آمریکا بازرسی دوسالانه برخی از پل‌های مهم آن کشور را به عنوان یک قانون تصویب نمود. بدین ترتیب سلامت سنجی پل‌ها با بازرسی‌های چشمی توسط کارشناسان مجرب شروع شد. در این بازرسی‌ها شناسایی برخی آسیب‌ها مانند ترک‌های مویی و یا آسیب‌های که به وضوح نمایان نبودند، با مشکل مواجه شد. از طرف دیگر تشخیص خسارت در سازه فقط مبتنی بر قضاوت بازرس بود.

با بکارگیری روش‌های تشخیص خسارت غیر مخرب مانند انتشار امواج صوتی، امکان شناسایی آسیب‌های پنهان بدون نیاز به قضاوت بازرس فراهم می‌شود [1]. هلفرد و کاتر در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش انتشار امواج صوتی موفق به شناسایی آسیب در یک تیر I- شکل شدند [2]. اعمال این روش‌ها فقط به صورت محلی و در قسمت‌های خاصی از پل عملی می‌باشد لکن برای ارزیابی سلامت کلی پل مناسب نیستند [3].

برای سلامت سنجی کلی سازه روش‌هایی ارائه شدند که با مقایسه مشخصه‌ای از پاسخ سازه در حالت سالم و آسیب دیده، وجود آسیب تشخیص داده می‌شد [4]. مشخصات سازه‌ای مانند تغییر شکل‌ها، شکل مود و...، تابعی از مشخصات فیزیکی سازه مانند سختی، میرایی و... هستند. با توجه به تعریف آسیب به عنوان تغییرات مشخصات فیزیکی [5، 4]، وجود آسیب باعث ایجاد تغییراتی در مشخصات سازه‌ای و در نتیجه نمود این تغییرات در پاسخ سازه می‌شود [6].

فارار و همکاران با مقایسه فرکانس‌های طبیعی مستخرج از پاسخ دینامیکی در حالت‌های سالم و آسیب دیده از یک

پل فولادی بر رودخانه ریو گرند، موفق به شناسایی آسیب در یکی از شاه تیرهای آن پل شدند. همچنین با ایجاد آسیب‌های بزرگتر در آن، دریافتند که با افزایش شدت آسیب، اندازه فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابد [7]. معیارهای دیگری مانند MAC_1 و $COMAC_2$ نیز به عنوان مشخصه‌ای برای آسیب مورد استفاده قرار گرفت [8]. لکن اساس این روش‌ها مقایسه پاسخ سازه در حالت سالم و آسیب دیده است. در بسیاری موارد پاسخ سازه در حالت سالم و یا مشخصات مکانیکی و یا طرح سازه در دست نیست. بنابراین روش‌هایی که بر مبنای مقایسه پاسخ سازه قبل و بعد از آسیب باشد، کاربردی نیستند.

در سال ۲۰۱۲ روری و کارکاترا با استفاده از روش تجزیه تجربی مودی، پاسخ جابه‌جایی دینامیکی یک تیر آسیب دیده تحت بار متمرکز عبوری را به دو مولفه سینوسی یکی با فرکانس بالا و دیگری با فرکانس پایین تجزیه کردند. در نمودار ترم سینوسی با فرکانس بالا ملاحظه شد که با عبور بار متمرکز از محل آسیب نوعی مدولاسیون بین موجی در آن ایجاد می‌شود. بنابراین، آن‌ها تشکیل قله در نمودار فرکانس لحظه‌ای ترم سینوسی با فرکانس بالا را به عنوان مشخصه‌ای برای آسیب پیشنهاد نمودند. بدین ترتیب با فرض یک مقطع منشوری، وجود و محل آسیب بدون نیاز به پاسخ سازه در حالت سالم تشخیص داده می‌شود [4]. از طرفی فرکانس لحظه‌ای برای این ترم حساسیت شدیدی به خطاهای عددی و نویز محیطی دارد [4].

سان و همکاران در سال ۲۰۱۵ پاسخ جابه‌جایی دینامیکی در نقطه وسط دهانه یک تیر دو سر ساده آسیب دیده تحت بار عبوری متمرکز را به یک مولفه دینامیکی (ترم سینوسی با فرکانس بالا) و یک مولفه شبه استاتیکی^۳ (ترم سینوسی با فرکانس پایین) تجزیه کردند. سپس با استفاده از قضیه بتی-ماکسول، مولفه استاتیکی آرام را به

1. Modal Assurance Criterion
2. Coordinate Modal Assurance Criterion
3. Quasi-static component

گام دوم: میانه پوش‌ها با رابطه $m_1(t) = \frac{S_{max}(t) - S_{min}(t)}{2}$ تعیین می‌شود. مطابق رابطه (۱) تابع h_1 به عنوان اولین IMF احتمالی تعیین می‌شود. چنانچه این تابع شرایط لازم مطابق تعریف IMF را ارضا نماید، به عنوان IMF1 مورد قبول خواهد بود و در غیر این صورت به عنوان سیگنال ورودی جدید در نظر گرفته شده و گام‌های اول و دوم تکرار می‌شود.

$$h_1 = S(t) - m_1(t) \quad (1)$$

با کسر اولین IMF از سیگنال اصلی و تکرار مراحل فوق، سیگنال مورد نظر به مجموعه‌ای از IMF ها و یک باقیمانده که با $r(t)$ نشان داده شده است، مطابق رابطه (۲) تجزیه می‌شود.

$$S(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i + r(t) \quad (2)$$

هوانگ و همکاران با محدود کردن انحراف معیار هر IMF احتمالی کمتر از ۰/۲ تا ۰/۳ ضمن ارائه شرط توقفی برای الگوریتم فوق، معنای فیزیکی هر IMF را نیز حفظ نمودند [10].

برای نشان دادن شیوه تجزیه یک پاسخ دینامیکی به مولفه‌های ذاتی نوسانش با استفاده از روش EMD، یک تیر منشوری دو سر ساده، با مقطع مستطیلی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و عرض ۲۰ سانتی‌متر به طول ۱۰ متر از جنس فولاد با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته و بار متمرکزی به شدت ۱۰۰ کیلوگرم و با سرعت ۲ متر بر ثانیه از آن عبور داده شد. با استفاده از توضیحاتی که به صورت مشروح در قسمت ۴-۳ ارائه می‌شود، آسیب به صورت یک ترک یکطرفه با عمق ۵ سانتی‌متر و با استفاده از یک فنر خمشی معادل (براساس روابط ۴ و ۵) با سختی $1031/73$ تن بر متر و در موقعیت طولی ۰/۷ طول دهانه مطابق شکل (۱) مدل‌سازی شد. پاسخ جابه‌جایی وسط دهانه آن در نرم‌افزار SAP 2000 به روش ویلسون-تتا با صرف نظر از میرایی تعیین و در شکل (۲) نشان داده شد.

تغییر شکل استاتیکی کل تیر تحت بار متمرکز در وسط دهانه نسبت دادند. از آن جا که آسیب به منزله کاهش سختی است، تغییرات ایجاد شده در نمودار انحنا تغییر شکل استاتیکی را به عنوان مشخصه‌ای برای آسیب در نظر گرفتند و بر اساس آن الگوریتمی برای شناسایی آسیب پیشنهاد کردند [9].

در این پژوهش الگوریتم پیشنهادی سان و همکاران مورد مطالعه قرار می‌گیرد و با مشخص شدن نقایص آن راه کارهایی برای برطرف ساختن آن‌ها ارائه شده و در نهایت با توسعه الگوریتم پیشین روش اصلاح شده‌ای برای شناسایی آسیب در عرشه پل‌ها ارائه می‌شود. همچنین کارایی این روش پیشنهادی این پژوهش در یک مدل عرشه واقعی مورد بررسی می‌شود.

۲- روش تجزیه تجربی مود EMD

این روش توسط هوانگ و همکاران برای پردازش و تجزیه سیگنال‌ها در حوزه زمان ارائه شد. هر سیگنال متشکل از تعدادی IMF_1 و یک تابع باقیمانده است. هر IMF تابعی است که دارای دو شرط زیر باشد [10].

۱- اختلاف تعداد بیشینه‌ها و تعداد مقادیر صفر تابع IMF بیشتر یک واحد باشد.

۲- در هر نقطه مقدار میانگین پوش بیشینه‌ها و کمینه‌ها در تابع برابر صفر باشد.

حال برای تجزیه سیگنال به خانواده IMF‌های تشکیل دهنده آن با استفاده از روش سرند کردن مطابق مراحل زیر عمل می‌شود [4].

گام اول: چنانچه سیگنال مورد نظر $S(t)$ نامیده شود، لازم است تمام مقادیر بحرانی محلی آن شناسایی شده و یک تابع درون یاب درجه سه به بیشینه‌های آن برازش شود. این منحنی پوش بالا $S_{max}(t)$ نامیده می‌شود. این برازش برای کمینه‌های سیگنال نیز تکرار شده و در نتیجه پوش پایین $S_{min}(t)$ بدست می‌آید.

شکل ۳. تجزیه پاسخ دینامیکی به مودهای ذاتی نوسان.

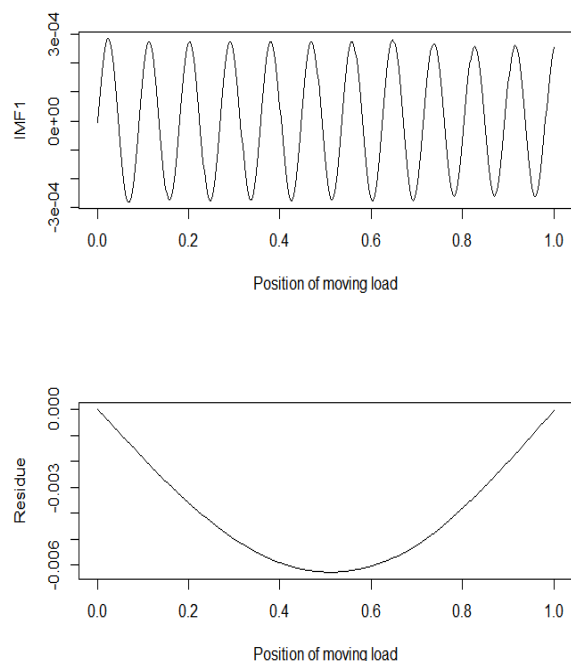


Fig. 3. Decomposition of the dynamic response into its intrinsic oscillation modes

۳- تشخیص خسارت با استفاده از پاسخ جابه‌جایی دینامیکی عرشه تحت بار متمرکز عبوری

چنانچه آسیب در سازه به منزله کاهش سختی در نظر گرفته شود، تحت یک بارگذاری استاتیکی با توجه به رابطه ۳ برای یک تیر برنولی وجود آسیب با افزایش موضعی انحنا (کاهش موضعی سختی) قابل شناسایی است [9].

$$\kappa(x) = w''(x) = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (3)$$

که در آن $\kappa(x)$ ، $M(x)$ ، $EI(x)$ و $w''(x)$ به ترتیب عبارتند از انحنا، لنگر خمشی حاصل از بارگذاری استاتیکی، سختی خمشی و مشتق دوم جابه‌جایی تیر در طول x .

بنابراین چنانچه تغییر شکل استاتیکی یک تیر مشخص باشد مطابق رابطه (۳) با دو بار مشتقگیری از آن می‌توان انحنا را تعیین نمود و به کمک آن وجود و محل آسیب را شناسایی کرد.

شایان ذکر است که برای تعیین پاسخ دینامیکی جابه‌جایی از سایر روش‌های دینامیکی تاریخچه زمانی مانند روش شتاب خطی نیز می‌توان استفاده کرد و همچنین نشان داده شده است که تاثیر میرایی در قسمت ارتعاش اجباری پاسخ (هنگام عبور بار متحرک روی تیر) بسیار ناچیز بوده و بنابراین قابل صرف نظر کردن است [9].

شکل ۱. مدلسازی تیر ترک خورده با فنر خمشی معادل.

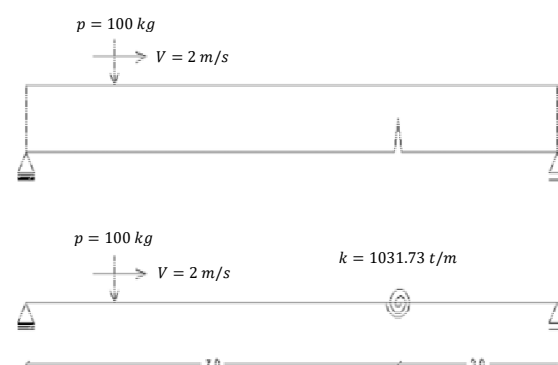


Fig. 1. Modeling cracked beam using equivalent flexural spring

شکل ۲. پاسخ جابه‌جایی دینامیکی وسط دهانه تحت بار عبوری.

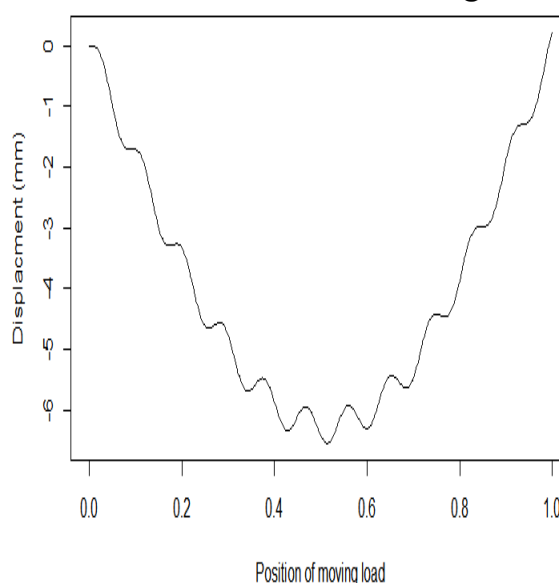


Fig. 2. Dynamic displacement response of midspan under traveling load.

پاسخ حاصل که در شکل (۲) نشان داده شده است، با استفاده از روش EMD به مودهای ذاتی نوسانش شامل یک IMF و باقیمانده، مطابق شکل (۳)، تجزیه شد.

۱-۳ الگوریتم پیشنهادی سان و همکاران [9]

سان و همکاران پاسخ دینامیکی جابه‌جایی یک تیر دو سر ساده تحت بار متمرکز عبوری را به یک مولفه دینامیکی و یک مولفه شبه‌استاتیکی تجزیه نموده و با استفاده از قضیه بتی-ماکسول مولفه شبه‌استاتیکی را به تغییر شکل استاتیکی تیر تحت بارگذاری استاتیکی متمرکز در محل ثبت پاسخ نسبت دادند و الگوریتم شناسایی آسیب خود را مطابق ذیل ارائه نمودند [9].

گام اول: تعیین جابه‌جایی دینامیکی وسط دهانه تیر تحت بار متمرکز عبوری

گام دوم: تجزیه پاسخ ثبت‌شده و استخراج مولفه شبه‌استاتیکی

گام سوم: تعیین انحنای تیر با استفاده از رابطه (۳)

گام چهارم: شناسایی آسیب براساس تغییرات ناگهانی در نمودار انحنا تیر

۲-۳ الگوریتم توسعه یافته شناسایی آسیب

الگوریتم ارائه شده توسط سان و همکاران دو ایراد اساسی دارد که کاربرد آن را در مقاصد عملی با مشکل مواجه می‌سازد.

اولاً روش ارائه شده برای تجزیه پاسخ و استخراج مولفه شبه‌استاتیکی از آن مستلزم ارتعاش‌سازه در یک مود و تعیین فرکانس طبیعی ارتعاش سازه است. گرچه در یک تیر دو سر ساده مود اول بر پاسخ جابه‌جایی حاکم است و می‌توان با دقت قابل قبولی از آثار مودهای بالاتر صرف نظر کرد [4، 9، 11] ولی در یک عرشه واقعی مودهای پیچشی نیز می‌توانند بر ارتعاش سازه موثر باشند. بنابراین روش تجزیه پیشنهادی سان و همکاران برای یک عرشه واقعی عمومیت ندارد.

از طرفی روش تجزیه ارائه شده توسط سان و همکاران [9] قادر به تفکیک نویز محیطی از پاسخ اصلی نیست و در نتیجه نتایج آن کاملاً به نویز و خطای حسگرهای جابه‌جایی وابسته است. از این رو کاربرد این روش برای پاسخ‌های ثبت‌شده واقعی که دارای نویز هستند، چندان مطمئن به نظر نمی‌رسد.

دوم مطابق رابطه (۳) انحنا متأثر از سختی خمشی و لنگر

خمشی در هر نقطه است. بنابراین با توجه به تغییرات لنگر در طول تیر لزوماً نمی‌توان تغییرات انحنا را به تغییرات سختی خمشی و در نتیجه به وجود آسیب نسبت داد. مطابق رابطه (۳)، هرگونه افزایش موضعی در انحنا تغییر شکل را تنها وقتی می‌توان به کاهش سختی و در نتیجه وجود آسیب نسبت داد که لنگر در طول تیر ثابت باشد.

بنابراین در این پژوهش پیشنهاد می‌شود برای استخراج مولفه شبه‌استاتیکی پاسخ جابه‌جایی از روش EMD استفاده شود. در واقع تابع باقیمانده روش EMD همان مولفه شبه‌استاتیکی و یا به عبارت دیگر همان تغییر شکل استاتیکی تیر است. استفاده از این روش ضمن عمومیت بخشیدن به روند تجزیه پاسخ، نویز محیطی نیز تجزیه شده و همچنین نیازی به تعیین فرکانس طبیعی ارتعاش نیز نیست.

برای رفع ایراد دوم الگوریتم سان و همکاران پیشنهاد می‌شود در دو نقطه مانند $0/2$ و $0/8$ طول دهانه پاسخ جابه‌جایی دینامیکی تحت بار متمرکز عبوری اندازه‌گیری شده و مولفه شبه‌استاتیکی متناظر با هر پاسخ استخراج گردد. در واقع هر مولفه شبه‌استاتیکی معادل تغییر شکل استاتیکی تیر تحت بارگذاری استاتیکی مجازی در محل ثبت پاسخ است. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از اصل جمع آثار قوا و برهم نهی این مولفه‌ها به تغییر شکل استاتیکی تیر تحت دو بار متمرکز استاتیکی در محل‌های ثبت پاسخ رسید. بدیهی است لنگر خمشی در طول تیر بین دو بار متمرکز مقداری ثابت دارد و مطابق با رابطه ۳ هرگونه افزایش موضعی در نمودار انحنا تغییر شکل نشانه وجود آسیب در آن محل است.

از این رو با اعمال اصلاحات فوق می‌توان به یک روش عملی و قابل اعتماد در تشخیص خسارت عرشه پل‌ها رسید که در حالت یک عرشه با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی در قالب الگوریتم ذیل آورده شده است.

گام اول: ثبت پاسخ جابه‌جایی عرشه تحت بار عبوری متمرکز در دو محل متقارن نسبت وسط دهانه تیر مانند موقعیت‌های $0/2$ و $0/8$ طول دهانه.

گام دوم: تجزیه پاسخ‌ها با روش EMD و استخراج مولفه شبه‌استاتیکی

شکل ۵. شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم سان و همکاران، محل آسیب در موقعیت 0.7 تا 0.75 طول دهانه قرار داده شده است.

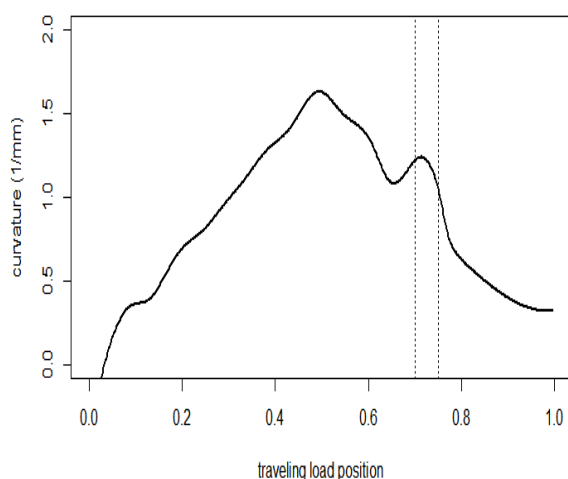


Fig. 5. Damage detection using Sun et al. algorithm, damage is located from 0.7 to 0.75 of span length

شکل ۶. شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، محل آسیب (خطچین) در موقعیت 0.7 تا 0.75 طول دهانه قرار داده شده است.

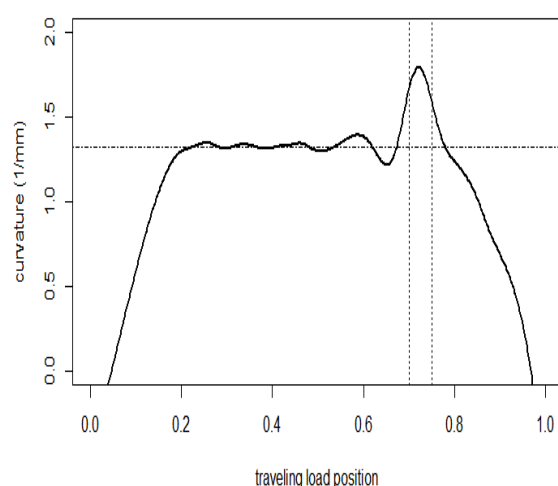


Fig. 6. Damage detection using proposed algorithm, damage (dash line) is located from 0.7 to 0.75 of span length.

همان گونه که در شکل (۶) ملاحظه می شود استفاده از الگوریتم پیشنهادی سبب بهبود نتایج و تشخیص ساده تر آسیب می شود. قله ایجاد شده در شکل (۵) و در موقعیت 0.4 تا 0.6 دهانه به دلیل تغییرات لنگر در وسط دهانه است و نه به دلیل کاهش سختی در نتیجه این نقطه معرف محل

گام سوم: برهم نهی یا جمع مولفه های شبه استاتیکی و تشکیل نمودار پاسخ جابه جایی استاتیکی معادل تیر تحت دو بار متمرکز

گام چهارم: تعیین نمودار انحنا با دو بار مشتق گیری از نمودار حاصل در گام قبل و شناسایی آسیب بر اساس قله (افزایش موضعی) ایجاد شده در نمودار انحنا

۴- مدل سازی عددی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم های مذکور سناریوهای مختلفی از آسیب تعریف شد که در ادامه هر یک توضیح داده شده است. در این قسمت، در نرم افزار SAP 2000 یک مدل اجزا محدود از یک تیر دو سر ساده به طول ۱۰ متر، با مقطع مستطیلی به ارتفاع ۱۰ سانتی متر و عرض ۲۰ سانتی متر از جنس فولاد با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد. آسیب با کاهش ارتفاع مقطع یک المان نیم متری به ۹ سانتی متر و در موقعیت طولی ۷ تا ۷/۵ متر مطابق شکل (۴) مدل سازی شد. همچنین شدت بار عبوری متمرکز ۱۰۰ کیلوگرم و سرعت آن ۱/۵ متر بر ثانیه است. پاسخ جابه جایی با صرف نظر کردن از میرایی و استفاده از روش ویلسون-تتا محاسبه شد.

شکل ۴. هندسه و بارگذاری تیر.

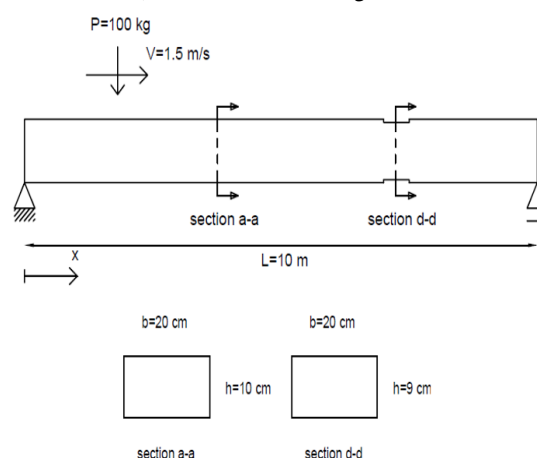


Fig. 4. Geometry and loading of the beam.

براساس الگوریتم سان و همکاران [9]، نمودار انحنا تغییر شکل تیر مطابق شکل (۵) تعیین و محل آسیب براساس تغییرات ناگهانی انحنا شناسایی شد.

شکل ۸ شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی.

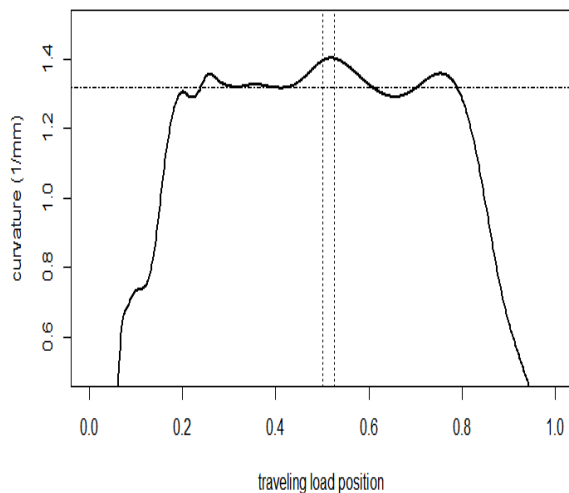


Fig. 8. Damage detection using proposed algorithm.

با توجه به شناسایی موفق آسیب در شکل (۸) مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی ضعف روش قبلی را با ایجاد یک ناحیه مجازی با لنگر ثابت (بین دو حسگر) برطرف کرده است.

۲-۴ چند آسیب هم‌زمان

از آن جا که در عمل ممکن است چند آسیب به صورت هم‌زمان در یک عرشه موجود باشد، عملکرد روش‌های این پژوهش در شناسایی چنین آسیب‌های برر سی می‌شود. بنابراین در مدل قبل سه آسیب به صورت کاهش یک سانتی‌متر از ارتفاع مقطع، در موقعیت‌های ۰/۳ تا ۰/۳۲۵ طول دهانه، ۰/۴۵ تا ۰/۵ طول دهانه و ۰/۶۵ تا ۰/۷ طول دهانه ایجاد گردید. شکل‌های (۹ و ۱۰) نتایج شناسایی آسیب در این سناریو با استفاده از روش‌های این پژوهش را نشان می‌دهند.

آسیب نیست. روش سان و همکاران قادر به ایجاد وجه تمایز میان تغییرات انحنای ناشی از آسیب و یا ناشی از تغییرات لنگر نیست. این موضوع در روش پیشنهادی این پژوهش با ایجاد ناحیه مجازی لنگر ثابت مرتفع شده است.

۴-۱ آسیب در وسط دهانه

همانطور که در قسمت ۳-۲ توضیح داده شد، الگوریتم پیشنهادی سان و همکاران در نقاط تغییر لنگر عملکرد مناسبی ندارد. این در حالیست که در یک عرشه دو سر ساده با مقطع ثابت، بیشترین تنش‌ها در وسط دهانه (جایی که در تحت بارهای عبوری مقدار لنگر بیشینه است) ایجاد می‌شود و در نتیجه احتمال خرابی در این ناحیه بیشتر است [12]. برای بررسی عملکرد دو الگوریتم موضوع این پژوهش، آسیبی مشابه با قسمت قبل به عمق ۰/۵ سانتی‌متر و در موقعیت ۰/۵ تا ۰/۵۲۵ طول دهانه مدلسازی شد. نتایج الگوریتم‌های شناسایی آسیب در شکل‌های (۷ و ۸) نشان داده شده است.

شکل ۷. شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم سان و همکاران.

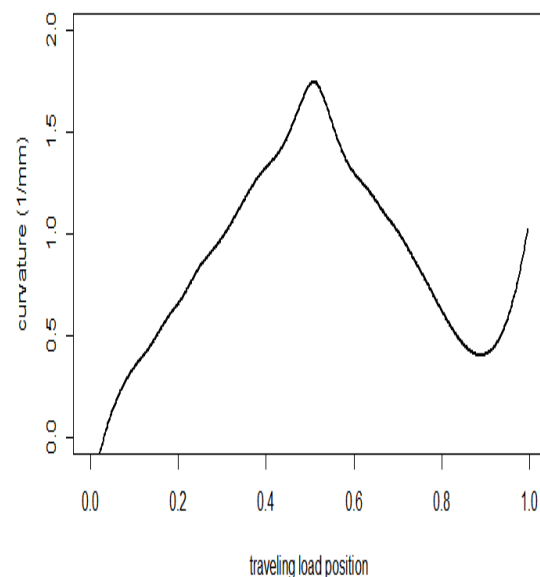


Fig. 7. Damage detection using Sun et al. algorithm.

همان گونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود الگوریتم شناسایی سان و همکاران در نقاط تغییر لنگر (وسط دهانه) کارایی مناسبی ندارد.

معادل مقطع ترک خورده استفاده نمود. با استفاده از روابط مکانیک شکست، سختی خمشی معادل برای ترک یکطرفه یکنواخت در تیر برنولی مطابق رابطه ۴ تعیین می‌شود [13].

$$K = \frac{Ebh^2}{72\pi f(\alpha)} \quad (4)$$

که در آن E مدول الاستیسیته مقطع، b عرض و h عمق مقطع است. $f(\alpha)$ نیز تابعی از نسبت عمق ترک به عمق مقطع (α) بوده و از رابطه (۵) تعیین می‌شود [13].

$$f(\alpha) = 0.6384\alpha^2 - 1.035\alpha^3 + 3.7201\alpha^4 - 5.1773\alpha^5 + 7.553\alpha^6 - 7.332\alpha^7 + 2.4909\alpha^8 \quad (5)$$

بنابراین آسیب به عنوان یک ترک باز به عمق ۲/۵ سانتی‌متر در موقعیت ۰/۵۵ طول دهانه در نظر گرفته شد. با منظور کردن $\alpha = 0.25$ ، مطابق با رابطه (۵) داریم $f(\alpha) = 0.0344$ و در نتیجه سختی فنر معادل از رابطه $K = 5141.28 \text{ ton/m}$ تعیین می‌شود.

شکل ۱۱. مدلسازی ترک یک طرفه باز با فنر خمشی.

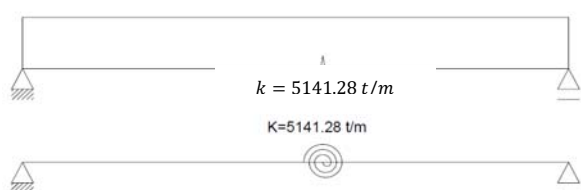


Fig. 11. Modeling a one-sided open crack with a flexural spring

شکل ۱۲. شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم سان و همکاران ۲۰۱۶.

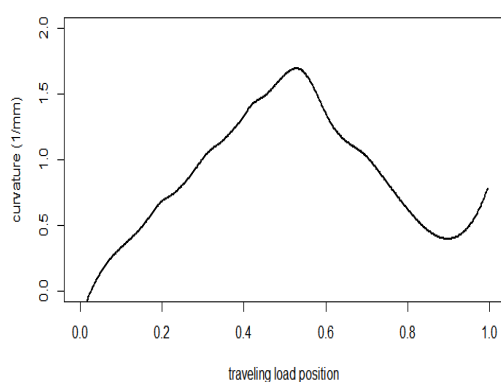


Fig. 12. Damage detection using Sun et al. algorithm 2016.

شکل ۹. شناسایی چند آسیب با استفاده از الگوریتم سان و همکاران.

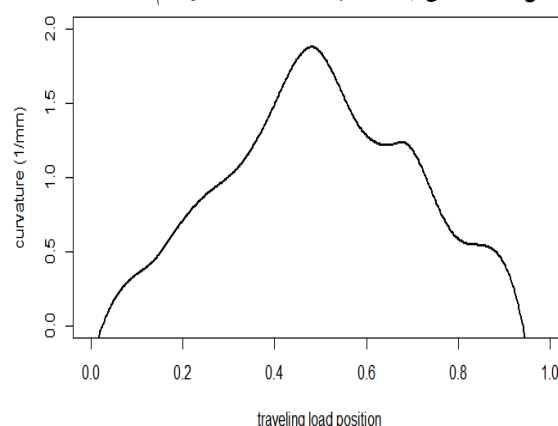


Fig. 9. Multiple damage detection using Sun et al. algorithm

شکل ۱۰. شناسایی چند آسیب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی.

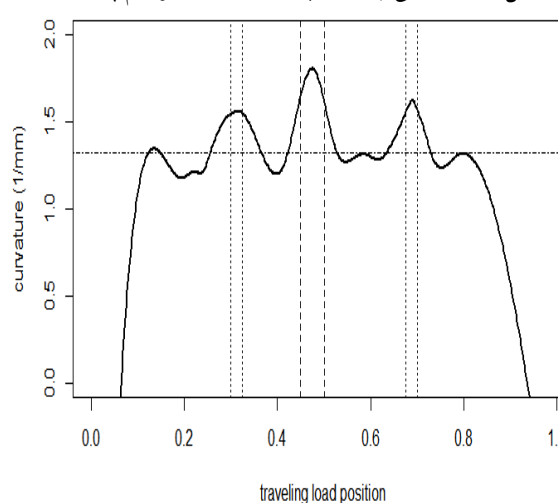


Fig. 10. Multiple damage detection using proposed algorithm.

همان‌گونه که در شکل‌های (۹ و ۱۰) ملاحظه می‌شود، شناسایی آسیب با استفاده از روش پیشنهادی بسیار موثرتر از روش سان و همکاران است و در روش پیشنهادی سه قله تشکیل شده، نشان دهنده وجود سه آسیب در محل قله‌های است.

۳-۴ آسیب از جنس ترک

مدلسازی آسیب با کاهش سطح مقطع به منزله مدلسازی آسیب از جنس پوسیدگی یا خوردگی است. برای مدلسازی ترک در این قسمت، آسیب با یک فنر خمشی مدل می‌شود. برای مدلسازی ترک در یک تیر با مقطع ثابت و فرضیات برنولی، می‌توان از یک فنر خمشی با سختی

عرشه پل به صورت دال درجا و با عرض ۱۱/۸ متر از جنس بتن بوده و مشخصات مصالح آن در جدول (۱) آورده شده است [12].

جدول ۱. مشخصات مصالح

Material	elastic modulus (t/m^2)	poisson coefficient	Strength (t/m^2)
Concrete	2336184	0.2	2500
Reinforcing steel	20394324	0.3	40000

Table 1. Material properties.

شکل ۱۵. مشخصات هندسی عرشه.

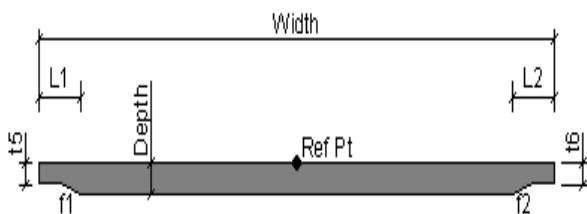


Fig. 15. Geometrical properties of the deck.

که اندازه‌های آن به شرح زیر است.

$$L_1 = L_2 = 1 \text{ (m)}, f_1 = f_2 = 0.6 \text{ (m)}$$

$$t_5 = t_6 = 0.3 \text{ (m)}, \text{Depth} = 0.85 \text{ (m)}$$

پایه‌ها شامل دو ستون هر یک به قطر ۱/۲ متر و ارتفاع ۱۰ متر تا زیر سرستون است. سرستون نیز با مقطع مستطیلی به عرض ۱/۵ متر و ضخامت ۱ متر و طول ۹/۸ متر است. جنس بتن مورد استفاده در عرشه، پایه و سرستون یکسان است.

آسیب به صورت کاهش ۳۰ درصد مدول الاستیسیته در المان‌های هاشور خورده در شکل (۱۶) مدلسازی شد. المان‌های آسیب دیده هر یک به طول ۱/۶۳ و عرض ۱/۲۵ متر و در موقعیت ۰/۴ تا ۰/۴۵ طول عرشه وسطی مطابق با شکل (۱۶) هستند. همچنین ۵ محور عبوری که به صورت خط منقطع در شکل مذکور نشان داده که برای بارگذاری همزمان تعریف شده است. دایره‌ها محل ثبت پاسخ جابه‌جایی در ۰/۲۵ و ۰/۷۵ طول دهانه را نشان می‌دهد.

شکل ۱۳. شناسایی آسیب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

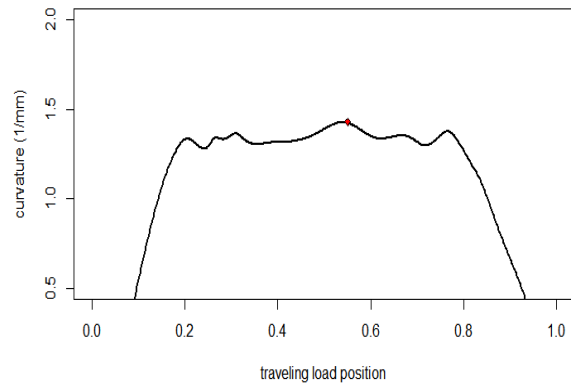


Fig. 13. Damage detection using proposed algorithm.

با توجه به شکل‌های (۱۲ و ۱۳) هر دو روش قادر به شناسایی ترک هستند. اگر چه روش پیشنهادی عملکرد بهتری در این زمینه نشان می‌دهد. انحنای تغییرشکل استاتیکی معادل حاصل از روش پیشنهادی، آسیب در موقعیت ۰/۵۵ طول دهانه و با علامت لوزی مشخص شده است.

۴-۴ عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مدل یک پل واقعی

به منظور بررسی عددی عملکرد روش پیشنهادی در یک پل واقعی، یک مدل پل تایید شده [12] در نظر گرفته شد. این پل شامل پنج دهانه هر یک به طول ۲۵ متر و عرضه عرشه ۱۱/۸ و همچنین دارای ۸ ستون دایره‌ای و عرشه بصورت دال درجا است که عرشه آن با استفاده از المان صفحه (Shell) و ستون‌ها با استفاده از المان قاب (Frame) در نرم‌افزار SAP 2000 مدلسازی شده است [12].

شکل ۱۴. مدل پنج دهانه [12].

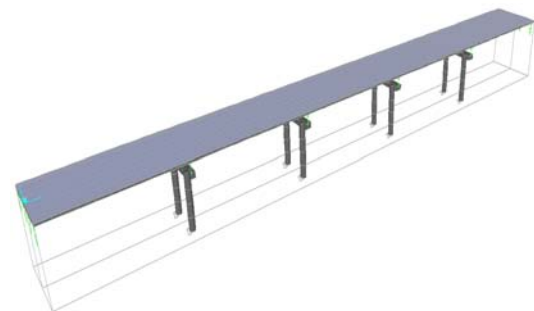


Fig. 14. Five span bridge model [12].

شکل ۱۶. محل نصب حسگرها (دایره توپر) و محورهای عبور بار (خط منقطع) در دهانه وسط پل.

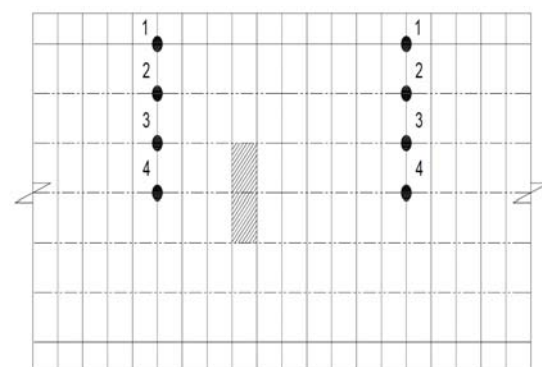


Fig. 16. Location of installed sensors and loading lanes.

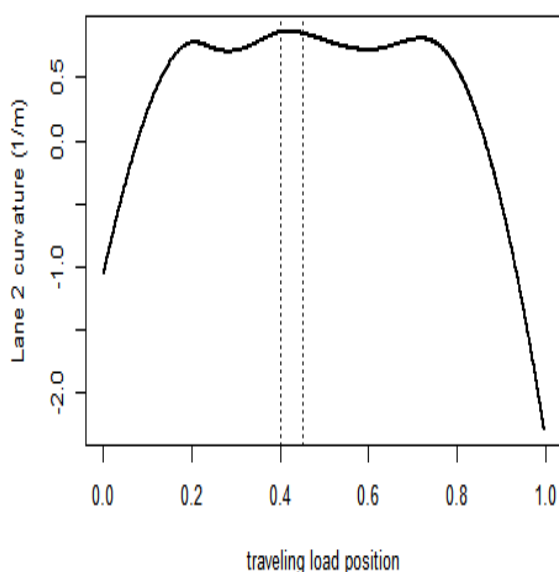


Fig. 18. Damage detection with respect to measured data from lane 2 sensors.

شکل ۱۹. شناسایی آسیب براساس پاسخ ثبت شده در حسگرهای محور ۳.

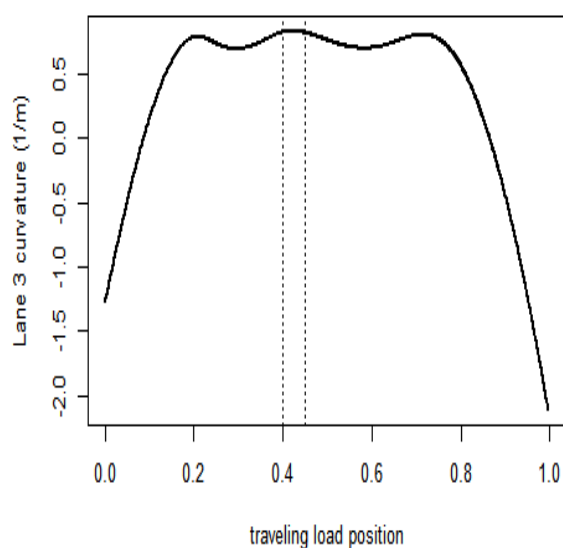


Fig. 19. Damage detection with respect to measured data from lane 3 sensors.

پنج بار متمرکز عبوری هر یک با شدت ۱۰ تن و با سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه، به صورت همزمان از محورهای عبوری تعریف شده (به صورت خط منقطع در شکل (۱۶))، از روی عرشه دهانه وسط عبور داده شد و در نهایت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی این پژوهش محل آسیب در هر پروفیل طولی مطابق شکل های (۱۷ تا ۲۰) تعیین شد.

لازم به ذکر است استفاده مستقیم از الگوریتم سان و همکاران بدلیل مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ جابه جایی دینامیکی امکان پذیر نیست.

شکل ۱۷. شناسایی آسیب براساس پاسخ ثبت شده در حسگرهای محور ۱.

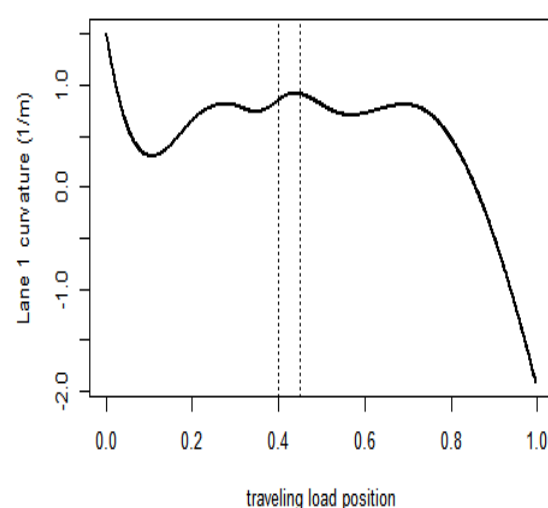


Fig. 17. Damage detection with respect to measured data from lane 1 sensors

شکل ۱۸۰. شناسایی آسیب براساس پاسخ ثبت شده در حسگرهای محور ۴.

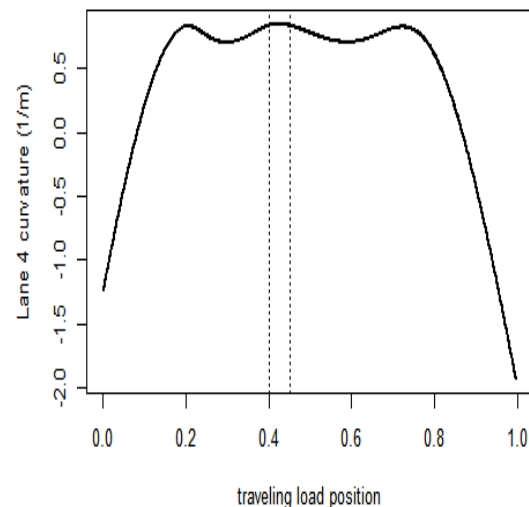


Fig. 20. Damage detection with respect to measured data from lane 4 sensors.

تشخیص خسارت در شرایط وجود چند آسیب همزمان نیز به مراتب ساده تر شد.

با توجه به نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر مدل یک پل واقعی، به نظر می رسد این روش در شناسایی موقعیت طولی آسیب عملکرد مناسبی دارد؛ اما برای تعیین موقعیت عرضی آسیب چندان کارا نیست. علت این امر را می توان به تغییر شکل های خمشی بیشتر عرشه در طول آن نسبت به جهت عرضی آن، نسبت داد. بنابراین روش پیشنهادی برای شناسایی موقعیت طولی آسیب در نواحی بین دو حسگر (محل ثبت پاسخ جابه جایی دینامیکی) پیشنهاد می شود.

۶- مراجع

- [1] Rehman, S.K.U., Ibrahim, Z., Memon, S.A. and Jameel, M., 2016. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 107, pp.58-86.
- [2] Holford, K.M. and Carter, D.C., 1999. Acoustic emission source location. In *Key Engineering Materials* (Vol. 167, pp. 162-171). Trans Tech Publications.
- [3] Ahmadi, H. and Daneshjoo, F, 2012, *Damage detection in railway bridges using time-frequency domain analysis*. Ph.D. Thesis, Department of Structural Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, (In Persian).
- [4] Roveri, N. and Carcaterra, A., 2012. Damage detection in structures under traveling loads by Hilbert-Huang transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, pp.128-144.
- [5] Farrar, C.R. and Worden, K., 2007. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), pp.303-315.
- [6] Hester, D. and González, A., 2017. A discussion on the merits and limitations of using drive-by monitoring to detect localised damage in a bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 90, pp.234-253.

با توجه به شکل های (۱۷ تا ۲۰)، محل طولی آسیب در عرشه با موفقیت شناسایی شد. انتظار می رفت با عبور بار در موقعیت های عرضی نزدیک تر به آسیب، قله های ایجاد شده بلندتر و نوک تیزتر شوند تا بتوان از چگونگی تغییرات بلندی قله ها به عنوان معیاری برای شناسایی موقعیت عرضی آسیب استفاده شود. لکن با توجه به شکل های مذکور این مورد اتفاق نیافتاد. بنابراین حساسیت روش پیشنهادی به موقعیت طولی آسیب بیش تر از موقعیت عرضی آن است.

۵- نتیجه گیری

استفاده از روش EMD برای استخراج مولفه شبه استاتیکی و یا به عبارت دیگر تغییر شکل استاتیکی معادل موجب عمومیت بخشیدن به الگوریتم سان و همکاران شد؛ از این رو استفاده از آن در پل های واقعی نیز میسر شد.

ناحیه مجازی لنگر ثابتی که در الگوریتم پیشنهادی این تحقیق ایجاد می شود موجب بهبود نتایج تشخیص خسارت شد و به طور مشخص ضعف روش قبلی را در شناسایی آسیب های وسط دهانه کاملاً برطرف شد. همچنین

- [11] Clough, R.W. and Penzien, J., 1995. Dynamics of Structures. Berkeley: Computers & Structures.
- [12] Tabaei S.A., Daneshjoo, F., 2014. Damage detection in deck of simply supported highway concrete bridges under traveling load using signal processing in frequency domain. MsC. Department of Structural Engineering, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, (In Persian).
- [13] Kindova-Petrova, D. Vibration-based methods for detecting a crack in a simply supported beam. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 201444(4), pp.69-82.
- [7] Farrar, C.R., Baker, W.E., Bell, T.M., Cone, K.M., Darling, T.W., Duffey, T.A., Eklund, A. and Migliori, A., 1994. *Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande* (No. LA-12767-MS). Los Alamos National Lab., NM (United States).
- [8] Tabaei S.A., Daneshjoo, F., 2016. *Development of COMAC and Damage index methods for damage detection in the near abutments of bridges*. Modares Civil Engineering Journal. Vol.15, No.4, (In Persian)
- [9] Sun, Z., Nagayama, T., Su, D. and Fujino, Y., 2016. A damage detection algorithm utilizing dynamic displacement of bridge under moving vehicle. *Shock and Vibration*. Vol.15, No.4.
- [10] 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, March. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In *Proceedings of the Royal Society of London A: mathematical, physical and engineering sciences* (Vol. 454, No. 1971, pp. 903-995). The Royal Society.

Improved damage detection algorithm using bridge dynamic deck displacement under traveling load

S. Roustazadeh¹, F. Danshjoo^{2*}

1. Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, IRAN.
2. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, IRAN.

danesh_fa@modares.ac.ir

Abstract

According to the vital role that bridges play in transportation system and also communications of a society, monitoring their structural safety and keeping theme in service is crucial. Numerous methods have been proposed for detecting probable damages in bridges. Unfortunately most of them are based on comparison between the response of bridge in an intact and damaged state. Therefore intact state response must be known. However, not always it's true in practice. So proposing a method which can determine and localize damages without prior knowledge of intact state is necessary. Such a method which was proposed by Sun et al. is studied carefully. Through the aforementioned method, the dynamic displacement response of a simply supported beam was decomposed into a dynamic component and a quasi-static component. Using Maxwell-Betti law of reciprocal deflection, the quasi-static component was attributed to the static deflection of the beam. Later damage which is defined by loss of stiffness, could be localized based on the abrupt changes in the static deflection curvature as it is related to bending moment and flexural stiffness of a beam. It is found out that the decomposition approach proposed by Sun et al. is restricted to fact that only one mode of oscillation must be dominant and also the natural frequency of motion must be determined through experimental measuring. Another limitation is that the abrupt changes in the curvature diagram cannot be related to damage essentially as curvature is also affected by the bending moment. In this study two modifications were proposed to get more accurate results in localizing the imposed damages. The first modification is the use of EMD method in order to decompose the displacement response into its intrinsic mode functions. Hence the aforementioned method could be used in real bridge displacement responses as higher modes corporations can also be determined and extracted through EMD process and finally the quasi-static component is determined as the residue of EMD algorithm. Also the ambient noise may be decomposed from the original signal, improving the method to work in real situations. The second modification is creating an imaginary constant moment length in the beam by the use of super position principle. So sudden increase in the curvature diagram is essentially a damage. Different scenarios of damage were studied and both methods have been used to detect damage in each scenario. Results show a great improvement in detection and localization of damage using the improved algorithm rather than the original proposed method. Eventually a five span real bridge model was taken into study. The improved damaged detection method could clearly determine the longitudinal position of the damage.

Keyword: Damage detection, structural health monitoring, signal processing, empirical mode decomposition.