



تعیین موقعیت آسیب در سازه‌های تیرشکل به کمک تجزیه مودهای ذاتی چند متغیره پاسخ ارتعاشات تصادفی

مه‌دی صالحی^{۱*} و منصور اعظمی^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰

چکیده

عیب‌یابی بر اساس مشخصات ارتعاشی سازه در چند دهه اخیر توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. روش‌های عیب‌یابی زیادی بر مبنای پارامترهای مودال سازه ارائه شده است؛ اما با توجه به پرهزینه بودن اجرای تست‌های مودال، استفاده مستقیم از پاسخ‌های ارتعاشی بیشتر مورد توجه بوده است. در این مطالعه، یک تکنیک جدید برای پردازش پاسخ‌های ارتعاشی تصادفی با هدف تعیین موقعیت عیب در سازه‌های تیرشکل تحت اثر نیروی تصادفی ارائه شده است. این تکنیک بر اساس تجزیه چند متغیره مودهای ذاتی سیگنال‌های پاسخ ارتعاشی تصادفی سازه است. مزیت استفاده از تبدیل چند متغیره مودهای ذاتی نسبت به تجزیه مودهای ذاتی این است که می‌توان به صورت همزمان و هماهنگ، پاسخ‌های ارتعاشی تصادفی تمام نقاط سازه را لحاظ کرده و توابع مودهای ذاتی متناظر را به دست آورد. با در نظر گرفتن این نکته که کاهش سختی موضعی ناشی از عیب متناظر با افزایش ناگهانی انحنای تغییر شکل سازه خواهد بود، از توزیع مکانی مودهای ذاتی برای تعیین محل عیب استفاده شده است. روش پیشنهادی روی یک تیر معیوب گسسته سازی شده پیاده سازی شده است. به منظور اثبات کارایی روش پیشنهاد شده اثر تعداد المان، محل عیب و همچنین شدت عیب، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله در مورد تمام حالات شبیه سازی رضایت بخش بوده است.

کلمات کلیدی: ارتعاشات؛ روش MEMD؛ تشخیص محل عیب؛ پاسخ ارتعاشات تصادفی.

Structural Damage Localization in Beam-Like Structures Using Multi-Channel Empirical Mode Decomposition of Random Response

M. Salehi^{1,*}, M. Azami²

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

²MSc, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Abstract

A lot of researchers have focused on vibration-based structural damage detection in last few decades. Most of proposed methods are based on modal parameters. Due to difficulties in performing modal tests, response-based methods have got much more attention. In this paper, a new technique for processing random vibrational response with the aim of structural damage localization is introduced. The technique is based on Multi-channel Empirical Mode Decomposition of random response of the structure. The main advantage of Multi-channel Empirical Mode Decomposition over traditional Empirical Mode Decomposition is its ability to extract consistent Intrinsic Mode Functions in the case of multi-channel measurements. Regarding the fact that a local stiffness reduction in a beam causes an abrupt change in the curvature of deformation, spatially distributed Intrinsic Mode Functions are employed for damage localization. The proposed method has been carried out on a finite element model of a damaged cantilever beam. To investigate the efficiency and robustness of the method, the effect of number of measurement points, damaged zone location as well as damage intensity have been studied in detail. The results in all cases are satisfactory.

Keywords: Vibration; MEMD; Damage Localization; Random Response.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با افزایش نیاز به بازرسی مداوم از سازه‌ها و سیستم‌های مکانیکی زمینه‌های بسیار زیادی برای تحقیقات در این زمینه فراهم آمده است. روش‌های رایج در بازرسی سلامت سازه‌ها علی‌رغم نقاط قوت فراوان دارای کاستی‌هایی می‌باشند. یکی از مهم‌ترین کاستی‌های این روش‌ها، محلی بودن بازرسی است، بدین معنا که محدوده عیب بایستی از پیش مشخص باشد و نمی‌توان با استفاده از این روش‌ها کل سازه را بازرسی نمود. از دیگر نقایص این روش‌ها که در شرایط واقعی بسیار مهم است، بالا بودن زمان و هزینه‌ها است. به همین دلیل در چند دهه اخیر توجه محققان به یافتن روش‌هایی معطوف بوده است که قابلیت بازرسی کل سازه را داشته باشد. تعداد زیادی از روش‌های ارائه شده مبتنی بر استخراج پارامترهای مودال سازه است. این روش‌ها علی‌رغم موفقیت آمیز بودن، کاربرد عملی زیادی ندارند؛ زیرا استخراج پارامترهای مودال یک سازه می‌تواند مشکل و پرهزینه باشد. دسته دیگری از تکنیک‌ها، مبتنی بر پردازش سیگنال‌های ارتعاشی حاصل از سازه است. روش‌های بسیار متنوعی برای پردازش این سیگنال‌ها ارائه شده است. پردازش سیگنال با هدف استخراج اطلاعات لازم از سیگنال‌های ثبت شده توسط سنسورها، برای تعیین موقعیت عیوب سازه‌ای است. در بیشتر موارد سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط سنسورها به وسیله نویزهای اندازه‌گیری آلوده شده و این نویزها سبب پیچیدگی بیشتر سیگنال‌ها برای پردازش شده و مانع استخراج اطلاعات مفید می‌شود؛ بنابراین روش پردازش سیگنالی که کارکرد آن در برابر نویز مقاوم باشد، نقش اساسی در کارکرد روش بر عهده دارد. تا کنون از انواع تبدیلات خطی و غیرخطی برای این منظور استفاده شده است که می‌توان به تبدیل فوریه^۱، تبدیل فوریه زمان کوتاه^۲، تبدیل موجک^۳ و توزیع وینگر-ویل^۴ به عنوان نمونه اشاره نمود. مبنای روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر شکل مود، این نکته است که کاهش موضعی سختی خمشی سازه، باعث افزایش ناگهانی و موضعی انحنای تغییر شکل

سازه می‌شود. در مقالات زیادی، تعیین محل عیب سازه به کمک انحنای شکل مودهای سازه‌ای انجام شده است. مشتق گیری عددی از شکل مودهای سازه برای محاسبه انحنای می‌تواند باعث بروز خطاهای عددی قابل توجهی گردد.

دیلنا و همکاران [۱] در پژوهش خود با استفاده از درون یابی منحنی توابع پاسخ فرکانسی یک پل، اقدام به عیب یابی نمودند. این روش دارای مزیت‌هایی از جمله، عدم نیاز به مدل عددی است؛ زیرا به طور مستقیم از داده‌های تجربی استفاده می‌کند. مهدی صالحی و همکاران [۲-۴] در پژوهش‌هایی از توابع پاسخ فرکانسی برای عیب‌یابی تیرها استفاده نمودند. آنها از تجزیه‌های POD و ICA، به منظور استخراج یک مشخصه با توزیع مکانی برای تعیین محل عیب استفاده نمودند. برای محاسبه انحنای مشخصه‌های به دست آمده علاوه بر روش تفاضل مرکزی، از تکنیک‌های GSM و DQM نیز استفاده شده است. دانشنگ وانگ و همکاران [۵]، از تجزیه POD برای عیب یابی یک سازه برشی استفاده کردند. آنها برای تعیین شدت عیب، از الگوریتم بهینه سازی PSO استفاده نمودند. محققان متعددی، عیب یابی سازه‌ها به کمک پاسخ ارتعاش غیرخطی را بررسی نمودند. از میان آنها می‌توان به پژوهش چنگ و همکاران [۶] اشاره کرد. آنها روشی بر مبنای توابع ولترا کرنل^۵ برای تشخیص وجود ترک در تیرها پیشنهاد کردند. ژی بو یانگ و همکاران [۷] در پژوهشی یک روش ساده مبتنی بر تجزیه طیفی فوریه برای محاسبه منحنی مودال تیرها به جای روش‌های سنتی قبلی ارائه کردند. در این روش اثر نویز بر نتایج به شکل قابل ملاحظه‌ای کمتر بوده است. از میان روش‌های متعدد عیب یابی پیشنهاد شده بر مبنای تبدیل موجک، می‌توان به پژوهش جیانگ و همکاران [۸] روی تشخیص آسیب در یک پوسته مخروطی با استفاده از منحنی شکل مود و تبدیل موجک اشاره نمود. سروستان و همکاران، از روش المان محدود طیفی یک تیر ترک دار را تحلیل نمودند. آن‌ها ترک را به کمک فنرهای پیچشی متمرکز مدل‌سازی نمودند [۹]. بعد از معرفی روش کارآمدی که توسط هوانگ و همکارانش [۱۰] ارائه شد،

¹ Fourier Transform

² short time Fourier analysis

³ wavelet transform

⁴ Winger-Ville Distribution

⁵ Volterra kernel

عملکرد بهتری دارد. کانوار و همکارانش [۱۸]، به تشخیص آسیب در یک مدل آزمایشگاهی پل با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ پرداختند. در این پژوهش آن‌ها آسیب را به وسیله حذف پیچ و مهره‌های پل، مدل سازی نمودند و از تبدیل هیلبرت هوانگ برای تجزیه و تحلیل داده‌های فرکانسی، طیف هیلبرت مرزی و فاز لحظه‌ای پل سالم و آسیب دیده استفاده کردند. رضائی و همکاران از تبدیل هیلبرت- هوانگ به منظور تحلیل سیگنال نویزدار استفاده نمودند. آنها پاسخ ارتعاشی آلوده به نویز یک تیر ترک‌دار را به کمک روش ارائه شده تحلیل نمودند [۱۹].

از آنجا که روش EMD مبتنی بر نقاط اکسترمم سیگنال است، پس راه حل مطمئنی محسوب نمی‌شود؛ زیرا این نقاط به شدت متأثر از نویز و نمونه‌برداری بوده و از طرفی رفتار ارتعاشی سازه را در یک نقطه بررسی می‌کند. در راستای حل این مشکل برای سیگنال‌های چند بعدی الگوریتم تجزیه موده‌های ذاتی چند بعدی (MEMD)^۳ توسط آقایان رحمن و مندیگ [۲۰] معرفی شد. آن‌ها نشان دادند که این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم پایه تجزیه موده‌های ذاتی قادر به تفکیک بهتر موده‌های بوده و تا حد زیادی مشکل پدیده اختلاط موده‌ها در این روش بر طرف شده است. به کمک این روش می‌توان به صورت همزمان رفتار ارتعاشی کل سازه را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش از روش تجزیه موده‌های ذاتی چند بعدی که تعمیمی از روش کلاسیک EMD است برای تشخیص محل عیب استفاده شده است. به این منظور، مدلی عددی از یک تیر یکسر گیردار به روش اجزای محدود ایجاد می‌شود. این تیر توسط تحریک تصادفی بارگذاری شده و پاسخ‌های ارتعاشی تصادفی ایجاد شده در هر یک از گره‌های تیر استخراج می‌شوند. استفاده از تحریک تصادفی به دلیل آن است که بسیاری از سازه‌های مهندسی حین کارکرد و یا در شرایط محیطی تحت تاثیر نیروهای تصادفی قرار دارند. سپس با استفاده از روش تجزیه موده‌های ذاتی چند بعدی تمام پاسخ‌ها به صورت هم‌زمان تجزیه شده، توابع مود ذاتی^۴ هر یک از پاسخ‌ها استخراج می‌شوند. در ادامه، از این

بسیاری از محققان از تبدیل هیلبرت هوانگ^۱ جهت عیب یابی سازه‌ها استفاده کردند. این روش خود بر پایه روش تجزیه موده‌های ذاتی^۲ (EMD) است و برخلاف تبدیل موجک به توابع پیش فرض نیاز ندارد. آبرین و همکاران [۱۱]، در پژوهشی با استفاده از روش تجزیه موده‌های ذاتی اقدام به عیب‌یابی سازه یک پل نمودند. آن‌ها دریافتند که جهت تشخیص آسیب با این روش نیازی به مشخصات مکانیکی جاده نیست. آید و همکاران [۱۲] در پژوهش خود با استفاده از روش تجزیه موده‌های ذاتی تغییرات سختی یک پل را به کمک پاسخ‌های شتاب ناشی از بارهای متحرک محاسبه کردند؛ همچنین آن‌ها با استفاده از یک روش EMD اصلاح شده توانستند مشکل پدیده اختلاط موده‌ها را بر طرف کنند که عموماً در تبدیل EMD وجود داشت. راتولیکار و همکاران [۱۳] در پژوهش خود عیب موجود در یک تیر ترک‌دار تحت بارگذاری های مختلف را با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ شناسایی نمودند. آن‌ها ترک را به صورت یک فنر پیچشی مدل نموده و به کمک تغییرات ناگهانی در پاسخ‌های ارتعاشی، مکان ترک را تشخیص دادند. کونک و همکاران [۱۴] نتایج به دست آمده از پردازش به‌وسیله تبدیل هیلبرت هوانگ و تبدیل موجک را مقایسه نموده و دریافتند که تبدیل هیلبرت روش کارآمدتری نسبت به تبدیل موجک است. رووری و کارکاترا [۱۵]، یک روش جدید بر اساس تبدیل هیلبرت هوانگ برای تشخیص آسیب یک پل تحت بار متحرک ارائه کردند. در این روش، پاسخ‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده توسط تبدیل هیلبرت هوانگ پردازش شده و سپس محل آسیب به کمک اولین فرکانس لحظه‌ای مشخص می‌شود. عمر امجد و همکاران [۱۶]، با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ و تغییرات فاز و زمان رسیدن سیگنال به اوج، میزان آسیب را تعیین نمودند. هسو و همکاران [۱۷] با استفاده از تبدیل هیلبرت هوانگ عیب یک تیر فولادی را مطالعه نمودند. آن‌ها جهت تشخیص آسیب، یک شاخص تشخیص آسیب بر اساس نسبت پهنای باند ارائه نمودند. آن‌ها کارایی روش‌های هیلبرت هوانگ و تبدیل فوریه سریع جهت پردازش سیگنال‌ها را مقایسه نموده و دریافتند که روش هیلبرت هوانگ برای آسیب‌های کوچک

^۳ Multivariate Empirical Mode Decomposition

^۴ Intrinsic Mode Functions (IMFs)

^۱ Hilbert –Huang Transform

^۲ Empirical Mode Decomposition (EMD)

۳- تجزیه سیگنال به روش تجزیه مودهای ذاتی

برای تجزیه سیگنال به مولفه‌هایی که فرکانس لحظه‌ای و فاز لحظه‌ای در همه جا قابل تعریف و دارای معنی باشند، روشی جدید توسط هوانگ و همکارانش [۱۰] معرفی شد که به روش تجزیه مودهای ذاتی یا EMD معروف است. با استفاده از این روش، سیگنال به مجموعه‌ای از توابع مود ذاتی تجزیه می‌شود. به دلیل این که این توابع دارای شکل مناسب برای تبدیل هیلبرت می‌باشند، فاز لحظه‌ای و فرکانس لحظه‌ای قابل محاسبه خواهد بود. بر اساس این روش، هر سیگنال را می‌توان به تعدادی سیگنال تجزیه نمود که بتواند هر دو شرط زیر را ارضا کند [۲۱]:

۱- اختلاف تعداد اکستریم‌ها و صفرهای سیگنال باید حداکثر برابر با یک باشد.

۲- مقدار متوسط دامنه محلی ماکزیمم و مینیمم هر قسمت سیگنال باید برابر صفر باشند.

به این سیگنال‌های تجزیه شده توابع مود ذاتی گفته می‌شود. برای تجزیه سیگنال‌های حوزه زمان و به دست آوردن توابع مود ذاتی بایستی مراحل زیر روی یک سیگنال به ترتیب انجام گردد:

۱- یافتن همه نقاط ماکزیمم و مینیمم محلی یک سیگنال

۲- تشکیل منحنی پوش بالایی از ماکزیمم‌های نسبی و تشکیل منحنی پوش پایینی از مینیمم‌های نسبی

۳- محاسبه میانگین منحنی پوش‌های بالایی و پایینی برای هر لحظه t که به آن میانگین پوش‌ها گفته می‌شود و با m_1 نشان داده می‌شود.

۴- تفریق میانگین پوش‌ها از سیگنال ورودی

$$h_1(t) = x(t) - m_1 \quad (7)$$

مقدار $h_1(t)$ اولین عضوی است که باید بررسی شود که آیا شرایط تابع مود ذاتی را دارا می‌باشد؟

هوانگ و همکارانش [۹] از انحراف استاندارد به عنوان شرط توقف استفاده نمودند. انحراف استاندارد SD از دو جمله متوالی به کمک رابطه (۸) حاصل می‌شود.

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (8)$$

توابع به منظور تعیین موقعیت آسیب سازه‌ای استفاده می‌شود. برای ارزیابی اثبات کارایی روش پیشنهاد شده، اثر پارامترهای موثر مانند تعداد المان، محل عیب، شدت عیب و همچنین محل اعمال نیروی تصادفی، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تبدیل هیلبرت هوانگ و سیگنال تحلیلی

تبدیل هیلبرت $H[x(t)]$ روی تابع حقیقی $x(t)$ که از $-\infty$ تا $+\infty$ گسترده شده، یک تابع حقیقی است که به صورت معادله (۱) بیان می‌شود:

$$H[x(t)] = y(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{0-\varepsilon} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du + \int_{0+\varepsilon}^{+\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \right] \quad (1)$$

با فرض $\int_{-\infty}^{+\infty} [x(t)]^2 dt < 0$ معادله بالا را می‌توان به صورت معادله (۲) نوشت:

$$H[x(t)] = y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(u)}{(t-u)} du \quad (2)$$

$y(t)$ تبدیل هیلبرت تابع اولیه $x(t)$ است که از لحاظ فیزیکی این تابع را می‌توان تغییر فاز $\frac{\pi}{2}$ در نظر گرفت؛ زیرا کانولوشن $x(t)$ با تابع $\frac{1}{\pi t}$ معادل ضریب تبدیل فوریه تابع در مقدار موهومی $\pm i$ در حوزه فرکانس است. از این رو مقدار دامنه $x(t)$ بدون تغییر می‌ماند، ولی تغییر فاز $\frac{\pi}{2}$ در کلیه مولفه‌های فرکانسی آن روی می‌دهد. با معرفی $y(t)$ سیگنال تحلیلی $z(t)$ به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود:

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (3)$$

سیگنال $z(t)$ تابعی از زمان با دامنه لحظه‌ای $a(t)$ و فاز لحظه‌ای $\theta(t)$ است که به ترتیب توسط معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده است:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \arctan \left[\frac{y(t)}{x(t)} \right] \quad (5)$$

در نهایت معادله (۳) را می‌توان به صورت معادله (۶) نوشت:

$$z(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (6)$$

تبدیل هیلبرت با محاسبه قسمت موهومی، اساس تعریف یک سیگنال تحلیلی را تشکیل می‌دهد.

۴- تجزیه سیگنال به روش تجزیه تجربی مودی

چند بعدی (MEMD)

در صورتی که اطلاعات اندازه‌گیری شده چند بعدی باشند، استفاده از EMD کلاسیک به این معناست که داده‌های هر کانال به صورت مجزا تحلیل شده و IMF های متناظر با هر کانال مستقلاً محاسبه شوند. در صورتی که میان داده‌های کانال‌های مختلف کوپلینگ شدیدی وجود نداشته باشد، استفاده از EMD یک متغیره نتایجی مشابه MEMD بدست خواهد داد. در چنین رویکردی، وابستگی میان داده‌های کانال‌های مختلف نادیده انگاشته شده و در نتیجه نتایج نهایی (به خصوص وقتی که داده‌های کانال‌ها همبستگی قابل توجهی دارند) بهینه نخواهند بود. این مشکل عمدتاً به دو صورت مشهود است: اول آن که تعداد IMF های به دست آمده از کانال‌های مختلف یکسان نمی‌باشد. ثانياً IMF های با اندیس‌های یکسان از کانال‌های مختلف ممکن است متناظر نباشند، به عبارت دیگر IMF های کانال‌ها ترتیب و توالی یکسانی ندارند. مضافاً این که IMF های حاصل از دو روش لزوماً یکسان نمی‌باشند.

روش EMD به منظور تجزیه و تحلیل سیگنال‌های غیر ثابت، برای به‌دست آوردن توابع مود ذاتی توسط هوانگ و همکارانش [۱۰] ارائه شد. روش EMD کلاسیک برای سیگنال‌های حقیقی یک بعدی مناسب است. در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ [۲۶ و ۲۵]، روش EMD برای سیگنال‌های پیچیده‌تر گسترش یافت. در این‌جا داده‌های مختلط بعنوان یک سیگنال دو متغیره با وابستگی بین قسمت حقیقی و موهومی در نظر گرفته شد. این روش پیشنهاد شده، تجزیه حالت تجربی دو بعدی (BEMD) نامیده می‌شود. بر این اساس رحمن و مندیگ [۲۰]، روش تجزیه حالت تجربی چند متغیره را پیشنهاد کردند. مهم‌ترین وجه تمایز این الگوریتم این است که منحنی پوش در هر حالت، از میانگین تمام منحنی‌های پوش جزئی محاسبه می‌شود که در جهت‌های مختلف در صفحه مختلط به‌دست می‌آید. آن‌ها این روش را برای تجزیه سیگنال‌های چند متغیره به‌عنوان ورودی و به‌دست آوردن توابع مود ذاتی چند متغیره پیشنهاد دادند. در ادامه، الگوریتم این روش برای سیگنال‌های زمانی N متغیره شرح داده می‌شود.

۵- اگر $h_1(t)$ یک تابع مود ذاتی نباشد، مراحل ۱ تا ۴ تکرار می‌شود؛ ولی این بار به جای استفاده از سیگنال اولیه، از $h_1(t)$ استفاده می‌شود؛ بنابراین پس از به کار بردن $h_1(t)$ به جای $x(t)$ و اعمال مراحل ۱ تا ۴ رابطه (۷) به شکل (۹) تبدیل می‌شود:

$$h_{11} = h_1 - m_{11} \quad (9)$$

این مراحل k بار تکرار می‌شود تا $h_1(t)$ یک تابع مود ذاتی باشد. در نهایت خواهیم داشت:

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (10)$$

هنگامی که شرط توقف ارضا می‌شود، اولین تابع مود ذاتی به‌صورت $c_1 = h_{1k}$ به‌دست می‌آید. پس از این که تابع مود ذاتی c_1 حاصل شد، مانده r_1 به صورت حاصل تفریق c_1 از سیگنال ورودی $x(t)$ تعریف می‌شود.

۶- برای یافتن تابع مود ذاتی بعدی بایستی از مرحله اول شروع نمود. با این تفاوت که در این مراحل، مانده r_1 جایگزین سیگنال ورودی می‌شود.

مراحل ۱ تا ۶ تا حصول c_j و r_j تکرار می‌شود و نتایج به‌صورت رابطه (۱۱) خواهد بود [۲۰]:

$$\begin{aligned} r_1 - c_2 &= r_2 \\ r_2 - c_3 &= r_3 \\ &\vdots \\ r_{n-1} - c_n &= r_n \end{aligned} \quad (11)$$

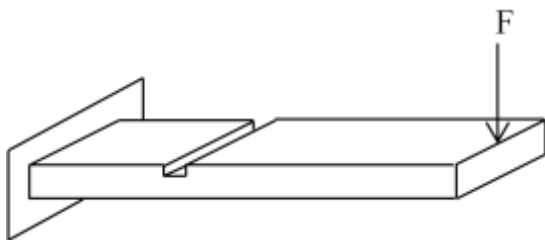
روش EMD هنگامی خاتمه می‌یابد که به طور ایده آل مانده r_n شامل هیچ نقطه اکسترممی نباشد. به‌عبارت دیگر، مانده یک تابع ثابت یا یکنواخت باشد. پس از اتمام مراحل تجزیه، سیگنال ورودی را می‌توان به صورت حاصل جمع توابع مود ذاتی‌ها و آخرین مانده به‌صورت معادله (۱۲) نوشت [۲۲-۲۴]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (12)$$

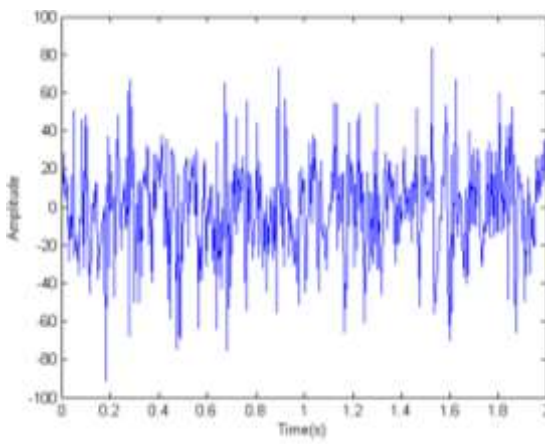
توابع مود ذاتی استخراج شده در هر لحظه دارای یک فرکانس لحظه‌ای و یک فاز لحظه‌ای و همچنین یک دامنه لحظه‌ای می‌باشند که جزء خواص ذاتی این توابع مود ذاتی بوده و برای هر تابع مود ذاتی در زمان‌های یکسان مقداری متفاوت دارند.

در محیط نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌شود. آسیب در تیر به صورت کاهش سطح مقطع در یک المان خاص از تیر مدل شده است. یک نیروی تصادفی در انتهای تیر باعث تحریک سازه می‌شود. پاسخ‌های جابجایی تصادفی همه گره‌های تیر محاسبه می‌شوند. در ادامه، به کمک روش MEMD سیگنال‌های پاسخ تجزیه می‌شوند و توابع مود ذاتی حاصل از سیگنال‌های پاسخ استخراج می‌شوند. در نهایت، به کمک توابع مود ذاتی هماهنگ به دست آمده برای تمام گره‌ها محل عیب شناسایی می‌گردد.

برای شبیه‌سازی از یک تیر فولادی یکسر درگیر، همانند شکل ۱، به طول ۶۰۰ میلی‌متر و مقطع مستطیلی ۵۰×۵ میلی‌متر استفاده شده است. مدول یانگ 200×10^9 پاسکال، چگالی 7800 kg/m^3 و نسبت پواسون $0/3$ است. شکل ۲ نیروی تصادفی اعمال شده به تیر در یکی از حالات شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تیر یکسر درگیر معیوب



شکل ۲- نیروی تحریک تصادفی

سیگنال N بعدی $[V(t)] = [v_1(t), v_2(t), v_3(t), \dots, v_N(t)]$ در نظر گرفته می‌شود. $X^{\theta k}(t) = [x_1^k, x_2^k, x_3^k, \dots, x_N^k]$ نشان دهنده‌ی یک مجموعه از بردارهای جهت با زاویه‌های $\theta^k = [\theta_1^k, \theta_2^k, \theta_3^k, \dots, \theta_{N-1}^k]$ روی یک کره مختلط است. الگوریتم MEMD برای این سیگنال طی روند زیر پیاده‌سازی می‌شود:

۱- یک مجموعه از نقاط برای نمونه برداری از انتخاب می‌شود.

۲- سیگنال ورودی $[V(t)]$ در امتداد بردارهای جهت $X^{\theta k}(t)$ برای همه مقادیر k تصویر می‌شود. به این ترتیب، مجموعه تصاویر $[P^{\theta k}(t)]_{k=1}^k$ حاصل خواهد شد.

۳- لحظه‌های زمانی $[t_i^{\theta k}]$ متناظر با نقاط ماکزیمم سیگنال تعیین می‌شوند.

۴- از داده‌های $[t_i^{\theta k}, V(t_i^{\theta k})]$ برای به دست آوردن میانگین منحنی‌های پوش چند متغیره $[e^{\theta k}(t)]_{k=1}^k$ میان‌یابی می‌شود.

۵- مجموعه منحنی‌های پوش میانگین $m(t)$ متناظر با جهات مختلف k به صورت معادله (۱۳) محاسبه می‌شوند:

$$m(t) = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k e^{\theta k}(t) \quad (13)$$

۶- سپس سیگنال باقی‌مانده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

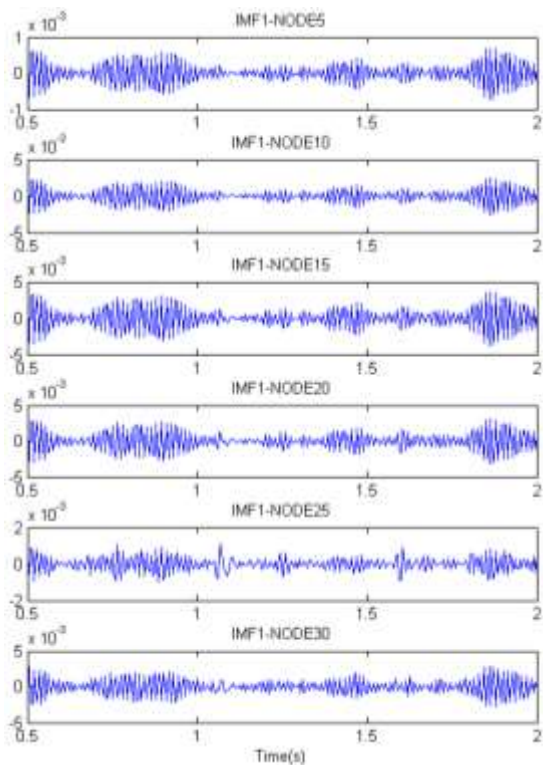
$$d(t) = x(t) - m(t) \quad (14)$$

اگر $d(t)$ شرط توقف IMF بودن را ارضا کند، $d(t)$ یک IMF چند متغیره بوده و مراحل ۱ تا ۵ روی سیگنال $x(t) - d(t)$ اعمال می‌شود و IMF های بعدی محاسبه می‌شود، در غیر این صورت تمام مراحل فوق روی سیگنال $d(t)$ اعمال می‌شود.

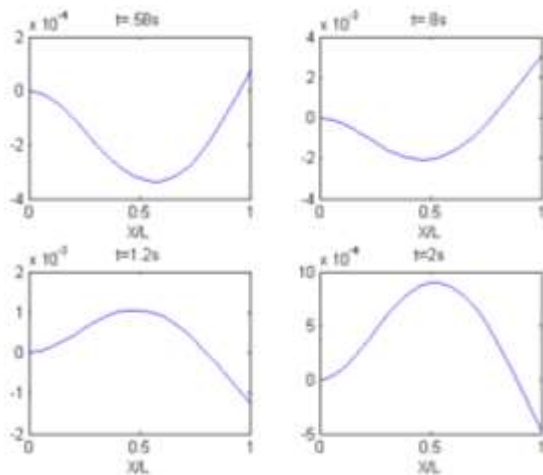
ساختار کلی روش MEMD شبیه روش EMD است، با این تفاوت که نسبت به این روش از لحاظ هم تراز بودن و سازگاری مودهای محاسبه شده بهبود یافته است.

۵- شبیه‌سازی عددی

به منظور تشخیص محل آسیب با استفاده از روش MEMD، یک مدل المان محدود از یک تیر یکسر درگیر



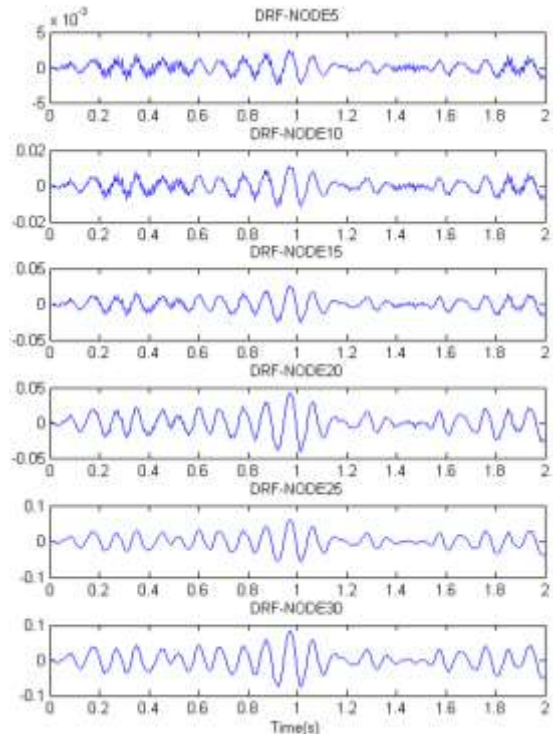
شکل ۴- توابع مود ذاتی اول برخی از نودهای تیر



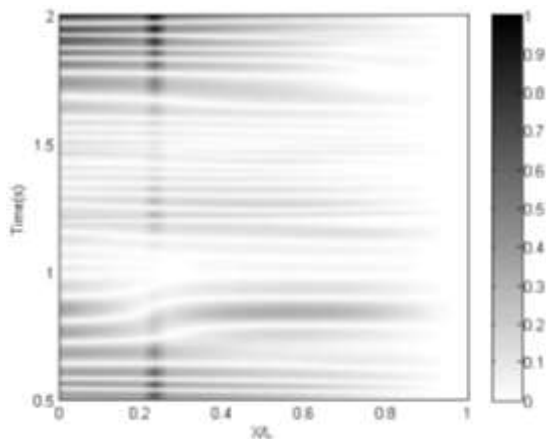
شکل ۵- تغییر شکل تیر مربوط به مود ذاتی اول در برخی از زمانها

۵-۱- بررسی اثر تعداد المان در تشخیص آسیب در حالت ایده آل، افزایش تعداد سنسورهای اندازه‌گیری پاسخ، به بهبود فرآیند عیب‌یابی کمک می‌کند. در عمل برای افزایش تعداد سنسورها محدودیت‌هایی وجود دارد. اضافه

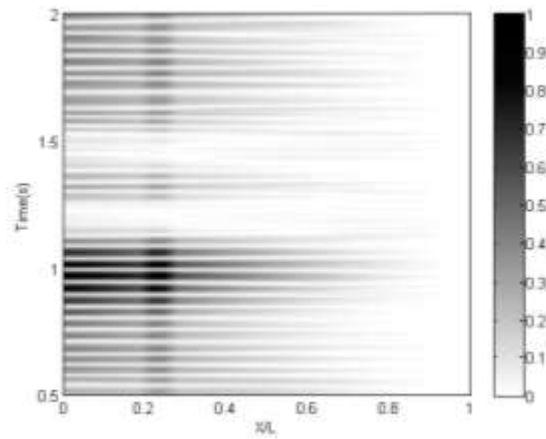
تیر مورد نظر توسط ۳۲ المان گسسته سازی شده است. به منظور شبیه سازی آسیب، مقطع یک المان که فاصله بی بعد آن از انتهای سمت چپ تیر برابر $X/L=0/24$ است، به اندازه ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. L طول کل تیر است و X فاصله از انتهای سمت چپ تیر می‌باشد. تعدادی از پاسخ‌های ارتعاشی در شکل ۳ نشان داده شده است. ماتریس پاسخ تصادفی به ابعاد 33×301 تشکیل می‌شود که تعداد سطرها برابر تعداد گام‌های زمانی است که این‌جا $0/05$ ثانیه در نظر گرفته شده است. کل زمان شبیه سازی در فاصله $0/5$ تا 2 ثانیه بوده و تعداد ستون‌های ماتریس برابر با تعداد نودهای تیر است. ماتریس پاسخ حاصل به کمک روش MEMD جهت به دست آوردن مولفه‌های مود ذاتی تحلیل شده و توابع مود ذاتی تمام گره‌های تیر استخراج می‌شود. شکل ۴ برخی از توابع مود ذاتی اول گره‌های تیر را نشان می‌دهد. فرم تغییر شکل تیر در هر لحظه با کنار هم گذاشتن توابع مود ذاتی متناظر آن لحظه برای تمام مودها تشکیل می‌شود. در شکل ۵ تغییر شکل تیر در برخی از زمانها بر اساس توابع مود ذاتی اول نشان داده شده است.



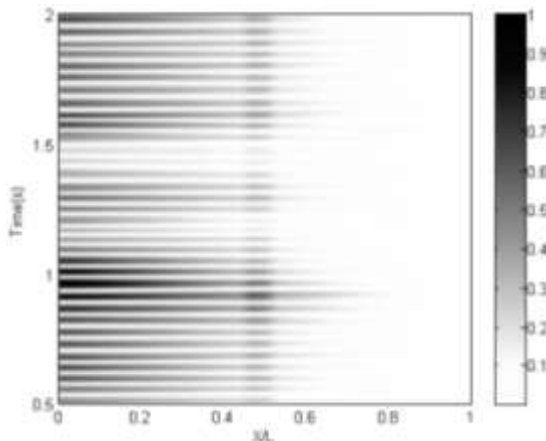
شکل ۳- پاسخ جابجایی تصادفی برخی از نودهای تیر



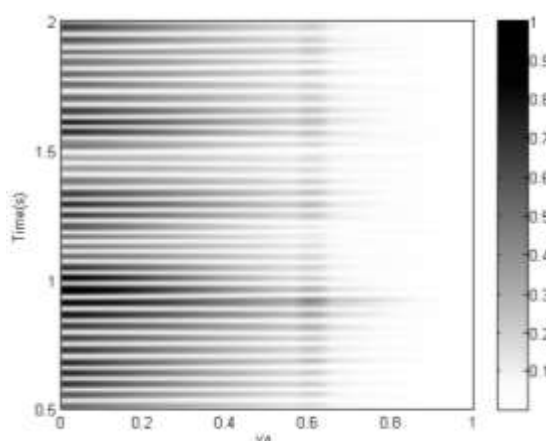
شکل ۷- تشخیص محل عیب تیر با ۶۴ المان



شکل ۶- تشخیص محل عیب تیر با ۳۲ المان



شکل ۸- تشخیص محل عیب در موقعیت $X/L=0/49$

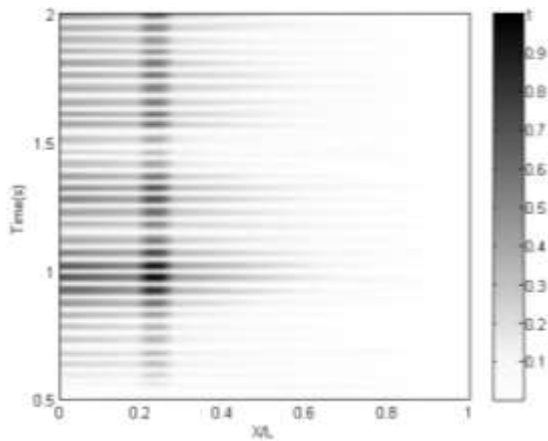


شکل ۹- تشخیص محل عیب در موقعیت $X/L=0/61$

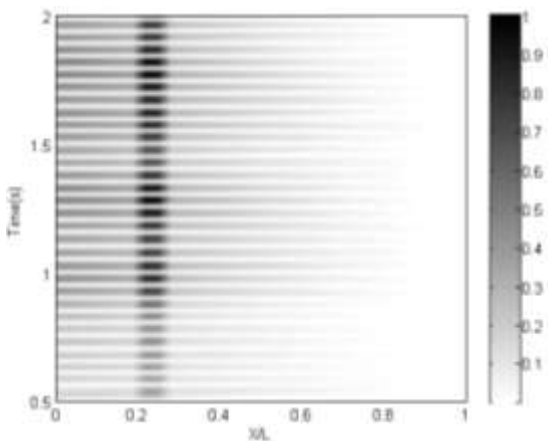
کردن سنسورها نه تنها هزینه‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه توزیع جرم سازه را نیز تغییر می‌دهد. برای بررسی تاثیر افزایش تعداد سنسورها که متناظر با افزایش تعداد المان‌های مدل است، فرآیند توضیح داده شده این بار روی همان تیر با در نظر گرفتن ۶۴ المان تکرار شده است. شکل ۷ نتایج به دست آمده را نمایش می‌دهد. این شکل محل آسیب سازه را با وضوح بیشتر و در بازه باریک‌تری نشان می‌دهد.

۵-۲- بررسی اثر محل عیب در تشخیص آسیب

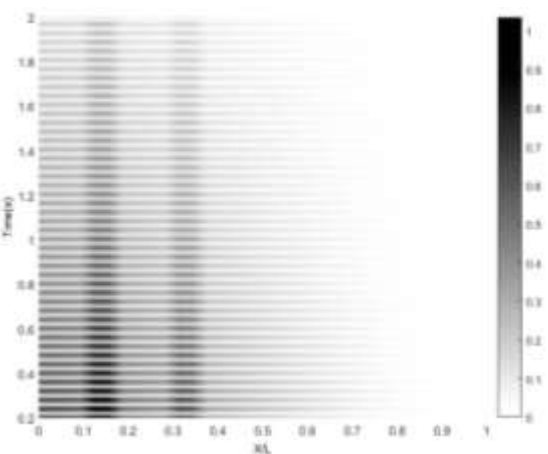
کارایی روش ارائه شده ممکن است، تابع محل قرارگیری آسیب روی سازه باشد. برای بررسی این موضوع، آسیب را یک بار در موقعیت $X/L=0/49$ و بار دیگر در موقعیت $X/L=0/61$ قرار داده شده، پاسخ‌های سازه‌ای مجدداً محاسبه می‌شوند. پس از آن فرآیند تشخیص آسیب برای این تیرها تکرار می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ تشخیص محل آسیب را در این دو حالت نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که این روش قادر به تشخیص محل آسیب در سرتاسر تیر است. با این حال هر چه قدر محل آسیب از انتهای سمت چپ تیر (تکیه گاه) فاصله بگیرد، آسیب با وضوح کمتری خود را نشان می‌دهد. این موضوع چندان دور از انتظار نیست؛ زیرا با دور شدن از تکیه‌گاه مقدار انحنای تغییر شکل‌های سازه کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- تشخیص محل عیب با شدت عیب ۲۰٪



شکل ۱۱- تشخیص محل عیب با شدت عیب ۴۰٪



شکل ۱۲- تشخیص محل دو عیب در موقعیت‌های $X/L=0/32$ و $X/L=0/14$

۵-۳- بررسی اثر شدت عیب در تشخیص آسیب
 برای بررسی اثر شدت آسیب یک بار شدت آسیب برابر ۲۰ درصد و یکبار ۳۰ درصد در نظر گرفته شده و فرآیند تشخیص آسیب برای این تیرها تکرار می‌شود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ محل آسیب با شدت‌های ۲۰ درصد و ۳۰ درصد را به ترتیب نشان می‌دهند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که هرچه قدر شدت عیب بیشتر باشد، اثر بیشتری در توابع مود ذاتی خواهد داشت. این موضوع، پتانسیل این روش را برای تعیین کمی شدت عیب نشان می‌دهد.

در ادامه به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص محل عیب سازه‌ها در شرایط واقعی، فرآیند تشخیص آسیب روی همان تیر تکرار می‌شود با این تفاوت که در این مرحله نیروهای تصادفی روی تمام گره‌های تیر اعمال می‌شود.

۵-۴- اثر وجود عیوب چندگانه

به منظور بررسی امکان تشخیص وجود بیش از یک عیب در تیر، دو عیب با شدت ده درصد در موقعیت‌های $X/L=0/14$ و $X/L=0/32$ در تیر ایجاد گردید. کلیه عملیات روش پیشنهادی مجدداً تکرار شده و اندیس‌های عیب نرمال شده بر حسب زمان و موقعیت محاسبه گردید. شکل ۱۲ نتایج حاصل را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، عمل کرد این روش برای چنین وضعیتی نیز قابل قبول است. بدیهی است که اگر عیوب چندگانه بیش از حد به یکدیگر نزدیک باشند، قدرت روش پیشنهادی در تفکیک موقعیت آن‌ها کم‌تر بود، زیرا اطلاعات پاسخ گره‌های معیوب هنگام محاسبه انحنا تداخل نموده و باعث کاهش کارایی خواهد شد. در چنین وضعیتی شاید بتوان شرایط را با استفاده از روش تریب دیفرانسیلی (DQM) به جای تفاضل مرکزی بهبود بخشید.

۶- تشخیص محل عیب تحت اثر بار تصادفی

گسترده

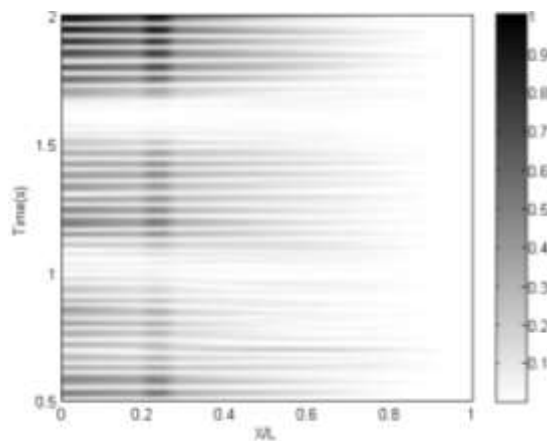
معمولاً در شرایط واقعی سازه‌ها تحت اثر نیروهای گسترده تصادفی می‌باشند. برای بررسی این شرایط، فرآیند پیشنهادی عیب‌یابی تیر با اعمال نیروهای تصادفی بر تمام گره‌ها تکرار می‌شود. شکل ۱۳ نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

تبدیل EMD پاسخ هر گره به صورت مستقل در نظر گرفته شده و اطلاعات جمع‌آوری شده از گره‌های مختلف با یک-دیگر هماهنگی ندارند. به همین دلیل، استفاده از EMD در عیب‌یابی با روند پیشنهاد شده نتایج چندان مطلوبی نخواهد داشت. این مشکل در این پژوهش با به‌کارگیری MEMD به جای EMD حل شده است. در مجموع، نتایج حاصل شده بیان‌گر پتانسیل مناسب تکنیک پیشنهادی برای عیب‌یابی سازه‌های تیرشکل است.

۸- مراجع

- [1] Dilena M, Limongelli MP, Morassi A (2015) Damage localization in bridges via the FRF interpolation method. *Mech Syst Signal Process* 52-53: 162-180.
- [2] Salehi M, ZiaeiRad S, Ghayour M, VaziriZanjani M.A (2010) A Structural Damage Detection Technique Base on Measured Frequency Response Functions. *Contemp eng Sci* 3(5): 215-226.
- [3] Salehi M, ZiaeiRad S, Ghayour M, VaziriZanjani M.A (2013) A frequency response based structural damage localization method using independent component analysis. *J Mech Sci Technol* 27(3): 609-619.
- [4] Salehi M, ZiaeiRad S, Ghayour M, VaziriZanjani MA (2011) A Frequency Response Based Structural Damage Localization Method Using Proper Orthogonal Decomposition. *Journal of Mechanics* 2(27): 157-166.
- [5] Wang D, Xiang W, Zeng P, Zhu H (2015) Damage identification in shear-type structures using a proper orthogonal decomposition approach. *J Sound Vib* 355: 135-149.
- [6] Cheng CM, Peng ZK, Don XJ, Zhang WM, Meng G (2015) A novel damage detection approach by using Volterra kernel functions based analysis. *J Franklin Inst* 352: 3098-3112.
- [7] Yang ZB, Radzienski M, Kudela P, Ostachowicz W (2017) Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams. *Mech Syst Signal Process* 84: 763-781.
- [8] Xiang J, Matsumoto T, Wang Y, Jiang Z (2013) Detect damages in conical shells using curvature mode shape and wavelet finite element method. *Int J Mech Sci* 66: 86-93.

[۹] سروستان و، میردامادی ح، غبور م (۱۳۹۴)، آنالیز ارتعاشات آزاد و واداشته تیر اویلر-برنولی ترک‌دار با بهره‌گیری از روش المان محدود طیفی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره ۷۰-۵۷ (۲): ۵*.



شکل ۱۳- تشخیص محل عیب با اعمال نیروی تصادفی گسترده

۷- نتیجه‌گیری

امروزه تعیین موقعیت و شدت آسیب در سازه‌ها موضوعی چالش برانگیز است. تحقیقات زیادی برای حل این مساله به کمک اطلاعات ارتعاشی انجام شده است. گلوگاه اصلی این تحقیقات، استخراج یک مشخصه از داده‌های ارتعاشی است که قادر باشد به خوبی موقعیت وقوع عیب را نشان دهد. در این مقاله، انحنای منحنی‌های تغییر فرم سازه متناظر با توابع مودهای ذاتی به دست آمده از تجزیه MEMD به عنوان مشخصه مورد نظر انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش به خوبی قادر به شناسایی محل آسیب در سازه‌های تیرشکل است. هرچند در این مقاله از تابع مود ذاتی (IMF) اول استفاده شده، اما سایر IMF ها نیز پتانسیل مناسبی برای این منظور دارند. تجربه نشان می‌دهد، در صورتی که آسیب حوالی نقطه عطف قرار داشته باشد، اندیس‌های مبتنی بر انحنای تغییر شکل تیر کارایی ضعیف‌تری دارند. استفاده از روش پیشنهاد شده این مشکل را تا حد زیادی مرتفع می‌نماید؛ زیرا توابع IMF بر مبنای داده بوده و با گذشت زمان تغییر می‌کنند. از دیگر مشکلات روش‌های کلاسیک، وجود نویز در داده‌ها است. این مساله به خصوص در صورتی حادث‌تر خواهد بود که برای محاسبه انحنا از روش‌های مشتق‌گیری عددی استفاده شود. استفاده از توابع IMF این مزیت را دارد که نویز اندازه‌گیری اغلب به صورت یکی از IMF‌های مشارکت‌کننده در سیگنال جدا شده و به نوعی داده‌ها دی نویز می‌شوند. در الگوریتم پایه

- Huang transform method. *J Vib Control* 19(6): 857-878.
- [18] Kunwar A, Jha R, Whelan M, Janoyan K (2011) Damage detection in an experimental bridge model using Hilbert-Huang transform of transient vibrations. *Struct Control Health Monit* 20: 1-15.
- [۱۹] رضائی م، بانان ع، ترقی ا (۱۳۹۳)، ارائه روش EMD اصلاح شده برای آنالیز سیگنال نویزدار در حوزه زمان-فرکانس. نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران ۲۰-۶: (۱)۱۶.
- [20] Rehman N, Mandic D.P (2010) Multivariate empirical mode decomposition. *Proc Roy Soc A* 466: 1291-1302.
- [21] Xianfeng F, Mingzuo J (2004) Gearbox fault detection using empirical mode decomposition. *Int Mech Eng Congress Expo* 12(4): 456-467.
- [22] Yu D, Cheng J, Yang Y (2003) Application of EMD method and Hilbert Spectrum to the fault diagnosis of roller bearings. *Mech Syst Signal Process* 19(3): 259-270.
- [23] Huang NE (2002) The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc Royal Soc Lond* 454(5): 903-995.
- [24] Beena P, Ganguli R (2010) Structural damage detection using fuzzy cognitive maps and Hebbian learning. *Appl Soft Comput* 12(3): 132-144.
- [25] Tanaka T, Mandic DP (2006) Complex empirical mode decomposition. *IEEE Signal Process Lett* 14: 101-104.
- [26] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P, Lilly JM (2007) Bivariate empirical mode decomposition. *IEEE Signal Process Lett* 14: 936-939.
- [10] Huang NE, Shen Z, Long SR, Wu MC, Shih HH, Zheng Q, Yen NC, Tung CC, Liu HH (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-steady time series analysis. *Proc RSoc London Ser A* 454: 903-995.
- [11] Obrien EJ, Malekjafarian A, Gonzalez A (2017) Application of empirical mode decomposition to drive-by bridge damage detection. *Eur J Mech A Solids* 61: 151-163.
- [12] Aied H, Gonzalez A, Cantero D (2016) Identification of sudden stiffness changes in the acceleration response of a bridge to moving loads using ensemble empirical mode decomposition. *Mech Syst Signal Process* 66-67: 314-338.
- [13] Ratolikar MD, Reddy MCS, Theja TR, Siddhartha C (2015) Crack detection for various loading conditions in beam using Hilbert-Huang transform. *J Mech Civ Eng* 12: 22-29.
- [14] Quek S, Tua P, Wang Q (2003) Comparison of Hilbert-Huang Wavelet and Fourier Transforms for Selected Applications, *Mini-Symp. on Hilbert-Huang Transform in Engineering Applications*. Newark, Delaware.
- [15] Roveri N, Carcaterra A (1998) Damage detection in structures under traveling loads by Hilbert-Huang transform. *Mech Syst Signal Process* 28: 128-144.
- [16] Amjad U, Yadav SK, Kundu T (2015) Detection and quantification of pipe damage from change in time of flight and phase. *Ultrasonics* 62: 223-236.
- [17] Hsu WK, Chiou DJ, Chen CW, Liu MY, Chiang WL, Huang PC (2012) Sensitivity of initial damage detection for steel structures using the Hilbert-