

### چکیده

تشخیص آسیب یکی از ابزارهای مهم پایش سلامت سازه برای ارزیابی بهتر سازه‌ها در طول عمر آنها می‌باشد. بسیاری از مطالعات به ارائه روش‌هایی برای تعیین محل آسیب با استفاده از مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی مانند مدل‌های شاخص پرداخته‌اند. هدف اصلی این مقاله ارائه روش جدید تشخیص محل آسیب ترکیبی برای شناسایی مکان‌های آسیب با استفاده هم‌زمان از شاخص‌های آسیب‌پذیری انرژی و جابه‌جایی می‌باشد. در بخش اول از طریق شاخص انرژی فرکانس آنی EDI و پاسخ‌های شتاب سازه به تعیین الگوهای آسیب پرداخته شده است. در بخش دوم به منظور ارزیابی روش اول و همچنین ارائه روشی سریع برای ارزیابی آسیب از طریق شاخص آسیب جابه‌جایی که متشکل از شاخص قابلیت اعتماد خطا  $\beta$  و شاخص تابع چگالی احتمال نرمال  $G(x)$  با استفاده از پاسخ‌های نسبی جابه‌جایی سازه ASCE ارائه گردیده است. نوآوری این روش استفاده هم‌زمان از پاسخ شتاب - جابه‌جایی در طی یک فرایند است که در ارزیابی سریع الگوهای آسیب مؤثرتر است. برای صحت‌سنجی روش‌های ارائه شده، علاوه بر الگوهای آسیب موجود در مسئله شاخص، آسیب جدید دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل گسترده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، محل دقیق آسیب وارده به سازه را با دقت کافی و سرعت مناسب تعیین می‌نماید.

**واژگان کلیدی:** تشخیص آسیب، پایش سلامت سازه، شاخص انرژی فرکانس آنی.

## تشخیص آسیب با استفاده از شاخص آسیب انرژی و جابه‌جایی در فاز تحلیلی مدل ASCE

محمدجواد خسرویانی

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

امید بهار (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، [omidbahar@iiees.ac.ir](mailto:omidbahar@iiees.ac.ir)

سید هومن قاسمی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

### ۱- مقدمه

تعیین محل آسیب در سازه‌ها دانست که این آسیب‌ها می‌تواند به صورت تغییر مشخصات هندسی، تغییر مصالح، کاهش سطح مقطع و نقص‌های مشخص در سازه باشد. پروسه اصلی تعیین آسیب در سازه‌ها شامل دست یافتن به ماهیت، محل اصلی، نوع و شدت آسیب می‌باشد [۱]. روش‌های متفاوتی برای تعیین آسیب پیشنهاد شده است. این روش‌ها به دو صورت آزمایش‌های مخرب و آزمایش‌های غیر مخرب تقسیم شده‌اند. روش‌های غیر مخرب بیشتر برای تشخیص آسیب مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است [۲]. تلاش‌های زیادی صورت گرفته که نشان می‌دهد روش‌های غیر مخرب نه تنها برای تعیین محل آسیب موضعی<sup>۱</sup> می‌تواند انجام شود، بلکه برای روش‌های جامع<sup>۲</sup> که بتواند شرایط

پایش سلامت سازه یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که در بحث‌های مهم کنترل و سلامت سازه‌های ساختمانی و زیربنایی به کار می‌رود. سازه‌ها ممکن است در طول عمرشان در معرض حوادث طبیعی و حوادث ساخت بشر قرار گیرند و این حوادث موجب نقص و آسیب‌های جدی در سازه شوند و خسارت‌های هنگفتی به سازه‌ها تحمیل کنند. بر این اساس پایش سلامت سازه‌ها به عنوان ابزاری کارآمد می‌تواند در حفاظت و ایمنی سازه‌ها نقش بسزایی را ایفا کند. هدف اصلی پایش سلامت سازه طبقه‌بندی عملکرد سازه‌ها و کمک به نگهداری آنها در طول دوره خدمت‌رسانی سازه‌ها می‌باشد. مراحل پایش سلامت سازه را نیز می‌توان شامل شناسایی مشخصات سیستم‌های سالم و آسیب‌دیده و

تقسیم شده از طریق پنجره زمانی تقسیم شده می‌باشد که به‌عنوان یکی از روش‌های آنالیز زمان فرکانس معرفی شده است. به همین دلیل تعامل بین پنجره‌های زمانی و فرکانس در این روش پیچیده است. در واقع می‌توان گفت تبدیل زمان کوتاه فوریه نمی‌تواند در یک زمان هم رزولوشن بهینه زمان و رزولوشن بهینه فرکانس را داشته باشد [۱۵].

تبدیل موجک سیگنال‌های سیستم نیز به‌عنوان یک روش مهم در زمینه فرکانس در دهه‌های اخیر می‌باشد. این تبدیل به‌عنوان یک روش سازگار پنجره‌ای فوریه است که توانایی تحلیل سیگنال‌های نامان را برای سیستم‌های خطی دارد [۱۶]. از جمله توانایی‌های این روش شبیه‌سازی محلی در دامنه زمان فرکانس، جداسازی با کیفیت جزئیات سیگنال و توانایی تجزیه کردن یک سیگنال به مجموعه‌ای از موجک‌ها می‌باشد [۱۷]. این روش به دلیل اندازه محدود موجک‌ها به‌صورت کلی دارای محدودیت می‌باشد. در حال حاضر آنالیز موجک یکی از مناسب‌ترین روش‌های آنالیز زمان فرکانس است و برای استخراج پارامترهای دینامیکی سازه به کار می‌رود. روش‌های ارائه شده بر اساس ارتعاشات به‌منظور شناسایی و تعیین محل آسیب سازه کاربردهای زیادی دارند و نقص‌هایی هم در آنها مشاهده می‌شود. برای مثال برخی از این روش‌ها به شدت آسیب حساس نیستند و قادر به شناسایی آسیب‌های کم نیستند. برخی از این روش‌ها به مقدار نوفه موجود در سیگنال حاصل وابسته‌اند و در دقت آنها اثر می‌گذارد.

هوانگ [۱۸] یک روش نوین برای آنالیز سیگنال‌های پاسخ خطی و غیرخطی سازه‌ها تحت عنوان تبدیل هیلبرت هوانگ ارائه کردند. این روش شامل دو بخش تجزیه مودی تجربی<sup>۵</sup> و تبدیل هیلبرت می‌باشد که پس از پردازش تجزیه مودی تجربی (EMD) با تبدیل هیلبرت ترکیب شده و روش تبدیل هیلبرت هوانگ (HHT) را شکل می‌دهد. بخش اول تجزیه مودی تجربی تکنیکی برای تجزیه سیگنال داده شده به مجموعه‌ای از سیگنال‌های المانی تحت عنوان تابع مودی ذاتی (IMF) نامیده می‌شود. در واقع توابع مودی ذاتی شامل مشخصات مودال سازه اصلی هستند و محتوای فرکانسی آنی آن مشخص می‌باشد. بر این اساس توابع مودی ذاتی معمولاً اول

سلامت کامل سازه را ارزیابی کند نیز می‌توان به کار برد. روش‌های جامع برای تشخیص آسیب تحت عنوان (GSDM)<sup>۳</sup> بیان شده است. یکی از محبوب‌ترین این روش‌ها، تکنیک تشخیص آسیب بر اساس ارتعاشات می‌باشد که مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. تشخیص آسیب بر اساس ارتعاشات به دو بخش مهم ۱- روش تشخیص آسیب مبتنی بر مدل و ۲- روش تشخیص آسیب غیر وابسته به مدل تقسیم می‌شود [۳]. در روش اول مدل سازه تابعی از مشخصات فیزیکی سازه مانند سختی، جرم و میرایی می‌باشد؛ بنابراین این روش نیاز به دقت بیشتری برای پارامترهای توصیفی سازه دارد و زمانی که مدل سازه پیچیده شود این روش محدودیت خواهد داشت. روش دوم مشکل روش اول را حل می‌کند و می‌تواند به آسانی برای پیش سلامت آنالیز سازه‌ها به کار رود [۴]. در واقع روش تشخیص آسیب غیر وابسته به مدل به یک مدل تحلیل سازه احتیاج ندارد و مشخصات آسیب از پاسخ‌های دینامیکی، استاتیکی و پارامترهای مودال سازه به دست خواهد آمد [۵].

بر این اساس روش‌های تعیین محل آسیب و شناسایی سیستم بر اساس ارتعاشات به دلیل ارزیابی‌های دقیق، هزینه کم و ابزارهای گسترده برای پردازش سیگنال، پیشرفت‌های زیادی داشته‌اند. روش‌های زیادی بر اساس ارتعاشات برای تعیین آسیب حاصل از پاسخ‌های دینامیکی مطرح شده است: از جمله این روش‌ها می‌توان به تبدیل سریع فوریه (FFT) [۶] تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) [۷]، پردازش سیگنال با تکنولوژی تبدیل موجک [۸-۹]، تبدیل هیلبرت-هوانگ (HHT) [۱۰-۱۱] و تبدیل ویگنر-ویل [۱۲] اشاره کرد.

روش تبدیل سریع فوریه (FFT) برای دریافت پارامترهای مودال سازه تحت ارتعاش تصادفی در دامنه فرکانسی به کار رفته است. اگرچه روش تبدیل سریع فوریه توانایی تخمین میرایی مودال را دارد، اما این روش دقت کافی برای تعیین آسیب در سازه‌های کامپوزیت را ندارد. با توجه به محدودیت‌های روش فوریه که مهم‌ترین آن عدم فراهم کردن دامنه زمان-فرکانس بود، آنالیزهای زمان فرکانس معرفی شده است [۱۳-۱۴]. روش تبدیل زمان کوتاه فوریه (STFT) به‌عنوان تبدیل فوریه داده‌های

جابه‌جایی توسط خسروییانی و همکاران [۲۳] به دست آمدند. در این روش ابتدا مقادیر پاسخ‌های شتاب سازه در حس‌گرهای مشخص به دست آمد و سپس با پردازش از تجزیه مودی تجربی کلی، انرژی فرکانسی آنها حساب شد و از طریق مقایسه مقادیر سالم و آسیب‌دیده، محل آسیب در سناریوهای آسیب مختلف به دست آمدند. همچنین برای تأیید روش ارائه شده از شاخص جابه‌جایی به ارزیابی روش مطرح شده پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که محل‌های آسیب در حالت سناریوهای مختلف آسیب، به درستی تعیین شده و روش ارائه شده توانایی تعیین محل آسیب را با دقت کافی دارد [۲۳]. در اکثر کارهای صورت گرفته تنها از یک پاسخ دینامیکی مانند شتاب و یا جابه‌جایی استفاده شده است و به نظر می‌رسد برای ارزیابی بهتر آسیب‌ها می‌توان از ترکیب پاسخ‌ها نیز استفاده نمود [۲۴].

هدف اصلی روش ارائه شده در این مقاله، آن است که مقادیر پاسخ‌های شتاب و جابه‌جایی سازه را با پردازش EEMD برای تعیین محل آسیب فاز I مطالعه در سازه شاخص ASCE، ترکیب می‌کند. روش ارائه شده برای پیدا کردن طبقه آسیب‌دیده و نزدیک‌ترین محل آسیب در سازه ASCE، با الگوهای آسیب مشخص قابل استفاده می‌گردد. بدین صورت که در ابتدا مقدار انرژی سیگنال فرکانس آنی حاصل از تبدیل HHT برای پاسخ‌های شتاب به دست می‌آید و همچنین تاریخچه زمانی پاسخ‌های جابه‌جایی حس‌گرهای مختلف نیز محاسبه شده و در نهایت به وسیله مقدار پراکندگی داده‌ها توسط پارامتر قابلیت اعتماد خطا و انرژی سیگنال‌های فرکانس آنی، محل‌های آسیب و شدت آن در سازه ASCE با دقت قابل قبولی تعیین خواهد شد.

## ۲- روش تجزیه مودی تجربی و روش تجزیه مودی تجربی کلی

روش تجزیه مودی (EMD) و روش تجزیه تجربی مودی گروهی (EEMD) دو ابزار قدرتمند برای تجزیه سیگنال‌های نامانای به دست آمده از فرآیندهای غیرخطی هستند. سیگنال‌های تجزیه شده مشخصه‌ای از موده‌های مستقل

دارای بیشترین محتوای فرکانسی است. با توجه به اینکه در تبدیل تجزیه مودی تجربی اثرات نویز و داده‌های زمانی درست سیگنال در نظر گرفته نمی‌شد اخیراً به جای تبدیل EMD از تجزیه مودی تجربی گروهی (EEMD)<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. در بخش دوم زمانی که تبدیل هیلبرت بر روی تابع مودی ذاتی به کار می‌رود مقادیر فرکانس آنی و دامنه هیلبرت به دست خواهد آمد. توضیحات کامل تبدیل هیلبرت هوانگ توسط هوان در مرجع [۱۹] ارائه شده است.

روش HHT به طور شایسته‌ای برای تعیین پارامترهای دینامیکی سازه و شناسایی سیستم به کار گرفته شده است. یانگ و همکاران [۲۰] روش HHT را بر روی پاسخ‌های ارتعاش آزاد ثبت شده از سازه شاخص ASCE به کار بردند. در نهایت مقادیر فرکانس و میرایی با دقت بالایی محاسبه شد. همچنین با استفاده از روش ارائه شده مقادیر میرایی و فرکانس طبیعی سازه بر اساس دامنه آنی و زاویه فاز محاسبه شدند. ون‌کین و همکاران [۲۱] با استفاده از انتشار موج آکوستیک در مصالح بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های CFRR و روش‌های HHT به تعیین فرکانس آنی و تعیین محل آسیب پرداختند. پس از دریافت انتشار موج‌های آکوستیک، مقادیر توابع مودی ذاتی موج‌ها از پردازش تجزیه مودی تجربی محاسبه شدند و با استفاده از تبدیل هیلبرت فرکانس‌های آنی، توابع مودی ذاتی در سطوح مختلف با فرکانس آنی با دقت مناسبی قابل تعیین خواهد بود. ژنگ و همکاران [۲۲] یک روش جدید پایش طبق پردازش از تجزیه مودی تجربی کلی و روش آستانه موجک برای تعیین پارامترهای مودال یک نیروگاه برق آبی مطرح کردند. در این روش شاخص نوفه برای تعیین درجه نوفه اجزای تجزیه شده با روش از تجزیه مودی تجربی کلی و آستانه موجک بیان شد. در انتها شاخص مطرح شده با روش‌های دیگر مثل آنتروپی آنها و الگوریتم پیاده‌سازی سیستم ویژه (ERA)<sup>۷</sup> برای بررسی عملکرد روش روی پاسخ‌های جابه‌جایی نیروگاه برق آبی مورد مقایسه قرار گرفت. نتیجه حاصل گویای آن بودند که روش ارائه شده توانایی لازم را جهت کاهش نوفه‌های زیاد را دارد. محل‌های آسیب در سازه شاخص ASCE، با استفاده از پاسخ‌های دینامیکی و پردازش تجزیه مودی تجربی کلی و همچنین پاسخ‌های

$y(t)$  تبدیل هیلبرت سیگنال  $x(t)$  می‌باشد.

#### ۴- فلسفه روش تعیین آسیب

روش‌های مختلف زیادی برای تعیین آسیب در سازه‌ها بر اساس ارتعاشات سیگنال‌های پاسخ سازه ارائه شده‌اند. در اکثر روش‌های ارائه شده شاخص‌های آسیب به‌عنوان تفاوت رفتارهای دینامیکی در سازه سالم و آسیب‌دیده و یا مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی می‌باشد. برای مثال جانسون و همکاران [۲۷] به شناسایی سیستم و تعیین مودهای فرکانسی آسیب در سازه شاخص ASCE در سازه بدون آسیب و سازه دارای الگوی آسیب بود، پرداختند.

هدف اصلی تحقیق پیش رو ارائه روش نوین تعیین محل آسیب بر اساس پاسخ‌های ارتعاش سازه ASCE می‌باشد. به همین منظور در بخش اول از انرژی سیگنال فرکانس آنی در حالت سالم و آسیب‌دیده استفاده شده است. زمانی که یک سیگنال به مجموع توابع مودی ذاتی تبدیل می‌شود با توجه به تأثیر آسیب در پاسخ‌های سازه و با توجه به وابستگی سیگنال پاسخ اصلی به سیگنال تحلیلی دامنه آنی و به‌خصوص فرکانس آنی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. بر این اساس پس از تبدیل هیلبرت بر روی IMF‌های پاسخ شتاب سازه، فرکانس آنی برای حس‌گرهای مختلف موجود در طبقات سازه محاسبه می‌شود. سپس مقدار انرژی سیگنال‌های حاصل از فرکانس آنی برای هر حس‌گر در حالت‌های مختلف محاسبه شده و بر اساس رسم شاخص انرژی فرکانس آنی، محل آسیب برای طبقات و حس‌گرها تعیین می‌شود. با توجه به تغییرات سختی در روش انرژی، آسیب‌های بیان شده مربوط به پاسخ‌ها شتاب می‌باشد و انرژی آن حاصل می‌شود. در ادامه نیاز به روش تعیین آسیب بر پایه پاسخ‌های جابه‌جایی وجود خواهد داشت. به‌منظور ارزیابی صحیح‌تر و اطمینان از محل آسیب مشخص شده در روش انرژی و همچنین در نظر گرفتن هم‌زمان پاسخ شتاب و جابه‌جایی سازه، از شاخص آسیب جابه‌جایی شامل نسبت شاخص قابلیت اعتماد خطا  $\beta$  استفاده شده است. در ابتدا پاسخ‌های جابه‌جایی سازه ASCE در هر حس‌گر برای حالت سالم و هر الگوی آسیب به دست می‌آید. برای تعیین پاسخ‌های تاریخچه زمانی جابه‌جایی نسبی

تحریک‌شده‌ی سازه تحت عنوان توابع مودی ذاتی می‌باشند. این روش، یک روش مستقیم و سازگار برای انواع سیگنال‌ها با مشخصات متفاوت می‌باشد. توابع مودی ذاتی (IMFs) یک فرضیه ساده دارند: یک سیگنال ساده که تعداد قله/دره‌ی آن با تعداد نقاط گذرنده از صفر برابر است (Zero-crossing extrema) [۱۸]. هر IMF یک بردار پایه برای سیگنال اصلی محسوب می‌شود که دارای فرکانس و دامنه متغیر با زمان است [۲۵]. اما روش EMD نقطه‌ضعف‌هایی دارد؛ هر تابع مودی ذاتی لزوماً یک بردار پایه‌ی مستقل نبوده و امکان دارد محدوده‌ی وسیع‌تر فرکانسی را در برگیرد. به این ترتیب، ممکن است به دلیل برخورد بین دامنه‌های توابع مودی ذاتی، در نهایت نتایج مناسبی به دست نیاید. برای غلبه بر این مسئله وو و هوانگ [۲۶] روش تجزیه تجربی مودی گروهی (EEMD) را ارائه نمودند. روش EEMD ادعا می‌کند که می‌تواند IMF‌های مناسب یک سیگنال را به‌درستی از سیگنال‌های نوفه جدا نماید. در این روش، نوفه‌های سطح کم تصادفی به سیگنال اصلی اضافه شده و پردازش EMD چندین بار انجام می‌شود تا توابع مودی ذاتی اصلی به‌دست آیند. به این ترتیب سیگنال‌های پاسخ اندازه‌گیری شده که با سطحی از نوفه آلوده شده‌اند، در روش EEMD تا اندازه‌ی زیادی به بردارهای پایه‌ی بدون اغتشاشات نوفه‌ای تجزیه خواهند شد. الگوریتم روش تجزیه تجربی مودی گروهی بر اساس مراحل موجود در [۲۶] سازماندهی شده است.

#### ۳- تبدیل هیلبرت هوانگ

با به کار بردن تبدیل هیلبرت بر روی هر تابع مودی ذاتی، داده‌های سری زمانی توابع مودی ذاتی محاسبه می‌شود. تبدیل هیلبرت (HT)<sup>۱</sup> برای داده‌های زمانی  $x(t)$  به‌صورت کامل در مرجع [۲۰] تعریف شده است. با توجه به استفاده از فرکانس آنی برای محاسبه شاخص انرژی، مقدار فرکانس آنی به‌صورت ساده شده در زیر تعریف شده است:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)،  $\theta(t)$  تابع فاز سیگنال تحلیلی که به‌صورت  $\theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$  می‌باشد که  $x(t)$  سیگنال داده‌های زمانی و

محاسبه می‌شوند. با توجه به مفاهیم پایه موجود در مورد انرژی یک سیگنال در [۲۵، ۲۸، ۲۹]، مقدار انرژی سیگنال فرکانس آنی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_{fh} = \int_0^{\infty} |I_{fh}(t)|^2 dt = \int_0^{\infty} \left| \left( \frac{d\theta(t)}{dt} \right)_{fh} \right|^2 dt \quad (2)$$

$$E_{fd} = \int_0^{\infty} |I_{fd}(t)|^2 dt = \int_0^{\infty} \left| \left( \frac{d\theta(t)}{dt} \right)_{fd} \right|^2 dt \quad (3)$$

که در آنها  $E_{fh}$  و  $E_{fd}$  مقدار انرژی فرکانس آنی به ترتیب در حالت‌های سازه سالم و آسیب‌دیده می‌باشد. همچنین  $I_{fh}$  و  $I_{fd}$  به ترتیب مقدار فرکانس آنی پاسخ‌های شتاب سازه در حالت سالم و آسیب‌دیده می‌باشد. مقدار  $\theta$  نیز در رابطه (۱) معرفی شده است. مقدار  $E_{fh}$  و  $E_{fd}$  برای همه حس‌گرهای موجود در سازه محاسبه می‌شود. سپس محل آسیب از طریق مقایسه سیگنال‌های انرژی فرکانس آنی به دست آمده در حالت‌های سازه بدون آسیب و آسیب‌دیده به دست می‌آید. شاخص آسیب در این بخش به عنوان شاخص آسیب انرژی فرکانس آنی EDI تعریف شده که به صورت زیر می‌باشد:

$$EDI_i = \frac{(E_{fh})_i - (E_{fd})_i}{(E_{fh})_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

در رابطه (۴) اختلاف مقادیر انرژی فرکانس آنی در حالت سالم و آسیب‌دیده برای هر حس‌گر محاسبه شده و به مقدار انرژی فرکانس آنی سالم در همان حس‌گر تقسیم می‌شود و به صورت نسبی مقیاس می‌شود. مقدار  $i$  شماره حس‌گر و  $n$  تعداد آنها می‌باشد. شاخص EDI برای هر الگوی آسیب محاسبه شده و در هر حس‌گر یا محلی که اختلاف شاخص EDI بیشتر باشد رخداد آسیب در خود همان حس‌گر و محل می‌باشد.

#### ۲-۴- روش تعیین محل آسیب با استفاده از شاخص آسیب جابه‌جایی

در این بخش از پارامترهای آماری و قابلیت اعتماد برای تعیین محل آسیب در سازه ASCE بر اساس ترکیب شاخص EDI و شاخص  $\beta$  استفاده شده است. روش‌های ارائه شده در این بخش از طریق تغییرات میانگین، انحراف معیار و شاخص قابلیت اعتماد

طبقات از اختلاف پاسخ جابه‌جایی حس‌گرها در طبقات مختلف استفاده شده است. برای افزایش دقت و ایجاد تابع خطای مناسب، سیگنال‌های پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی سالم و آسیب‌دیده در نقاط مشخص سیگنال از هم کسر شده و مقدار منحنی توزیع نرمال برای آنها ترسیم می‌شود. بر اساس تعداد حس‌گرها می‌توان منحنی‌های ترکیب شاخص انرژی فرکانس آنی و تابع توزیع نرمال جابه‌جایی طبقات را رسم و در نهایت بر اساس مقایسه آنها برای تعیین محل آسیب در طبقات و حتی در حس‌گرها استفاده نمود.

#### ۴-۱- روش تعیین محل آسیب بر اساس انرژی فرکانس آنی شتاب‌های سازه

در بخش اول یک روش محاسباتی برای استخراج و تعیین آسیب در سازه ASCE بر اساس ترکیب روش HHT و انرژی سیگنال پیشنهاد شده است. تعیین محل آسیب در این روش، از طریق تغییرات در انرژی سیگنال‌های فرکانس آنی به عنوان نتیجه آسیب می‌باشد. در واقع تبدیل HHT قادر به تجزیه سیگنال‌های پاسخ شتاب سازه در دامنه زمان به اجزای سیگنال‌های در سطح فرکانسی می‌باشد که می‌تواند جزئیات را مانند فرکانس آنی تخمین بزند؛ بنابراین فرکانس آنی تغییرات را به سرعت تحلیل می‌کند و انرژی سیگنال فرکانس آنی نیز کمک می‌کند تا حسگری را که فرکانس و انرژی بالاتری دارد به سرعت نمایش دهد. انرژی یک سیگنال نیز برای استخراج مشخصه سیگنال می‌تواند به کار رود. با توجه به اینکه در مفهوم فیزیکی، انرژی جابه‌جایی است، تغییرات انرژی سیگنال می‌تواند تعیین آسیب مؤثر باشد. بر این اساس در ابتدا همه پاسخ‌های شتاب حس‌گرهای موجود دریافت می‌شود. با توجه به تأثیرگذاری آسیب‌ها بر روی شتاب سازه خصوصاً به دلیل تغییر در مشخصات دینامیکی سازه، از پاسخ‌های شتاب در حالت سازه سالم و سازه آسیب‌دیده استفاده شده است. پس از آن مراحل تبدیل HHT به نحوی که در بخش (۳) بیان شد بر روی پاسخ‌ها انجام گرفته و در نهایت سیگنال‌های فرکانس آنی در هر حس‌گر برای حالت سالم و آسیب‌دیده

مقدار شاخص  $G(x)$  هر حس گر بر اساس مقدار خطا به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$[G(x)]_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(ERV_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (۶)$$

که شاخص  $G(x)_i$  مقدار تابع چگالی احتمال نرمال هر حس گر،  $\mu_i$  میانگین مقدار خطای هر حس گر،  $\sigma_i$  مقدار انحراف استاندارد مقدار خطای هر حس گر و  $ERV_i$  مقدار خطای هر حس گر می‌باشد. با محاسبه مقدار شاخص  $G(x)_i$  برای همه حس گرها و ترکیب شاخص مقدار تابع چگالی احتمال و شاخص  $EDI_i$  می‌توان یک منحنی سه‌بعدی ترسیم نمود و بر اساس اختلاف این دو شاخص و تأثیرات آن در حس گرهای مختلف به محل آسیب پی برد. همچنین به منظور ارزیابی سریع و آسان‌تر پارامتری به نام  $\beta$  معرفی می‌شود که از حاصل تقسیم مقدار میانگین به انحراف استاندارد که در قبل بیان شده است و به صورت زیر می‌باشد:

$$\beta_i = \frac{\mu_i}{\sigma_i} \quad (۷)$$

که  $\beta_i$  شاخص آسیب قابلیت اعتماد خطای هر حس گر،  $\mu_i$  میانگین مقدار خطای هر حس گر به صورت  $\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ERV_j$ ،  $\sigma_i$  مقدار انحراف معیار مقدار خطای هر حس گر به صورت  $\sigma_i = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (ERV_j - \mu_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$  نامیده می‌شود که  $n$  تعداد داده‌های موجود است.

در نهایت می‌توان پارامتر قابلیت اعتماد را در برابر شاخص انرژی فرکانس آنی  $EDI$  رسم نمود و بر اساس مقیاس صورت گرفته به راحتی محل حس گر و طبقه آسیب‌دیده را تعیین نمود. در واقع حس گرهایی که مقدار انرژی بیشتری در برابر شاخص آسیب قابلیت اعتماد دارند از احتمال آسیب بیشتری برخوردار خواهند بود. همچنین هرچه مقدار میانگین خطاها بیشتر باشد و پراکندگی آنها کمتر، شاخص قابلیت اعتماد خطا بیشتر خواهد بود. به منظور مطالعه بیشتر در مورد شاخص  $\beta_i$  می‌توان به مراجع [۳۰-۳۱] اشاره نمود.

## ۵- مدل سازه شاخص ASCE

مطالعه سازه شاخص ASCE به وسیله IASC و کارگروه پایش سلامت سازه ASCE به عنوان یک منبع اصلی به منظور ارزیابی

خطا  $\beta$  برای سیگنال‌های پاسخ جابه‌جایی سازه می‌باشند.

در این بخش در ابتدا پاسخ‌های جابه‌جایی همه حس گرهای نصب شده به دست آمده است. با توجه به حذف بخش‌هایی از سازه به عنوان آسیب، کاهش سختی ایجاد شده باعث تغییر در شکل مودی سازه می‌شود و خصوصاً جابه‌جایی‌های نسبی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا از پاسخ‌های جابه‌جایی سازه استفاده شده است. بر این اساس پس از دریافت همه جابه‌جایی حس گرها مقادیر پاسخ تاریخچه زمانی جابه‌جایی برای هر حس گر حاصل شده و در نهایت از آنها به عنوان پاسخ اصلی استفاده می‌شود. دلیل آن است که اختلاف جابه‌جایی‌های طبقات و رخداد آسیب در طبقات مختلف، می‌تواند با در نظر گرفتن پاسخ‌های جابه‌جایی‌های طبقات دیگر اثرات آسیب را مناسب‌تر آشکار کند. پس از آن به منظور در نظر گرفتن اثرات پاسخ تاریخچه زمانی جابه‌جایی سالم و آسیب‌دیده در یک بخش، از مقدار خطای مشخصی استفاده می‌شود که در تعداد نقاط یک سیگنال اختلاف پاسخ‌های سالم و آسیب‌دیده را می‌توان به دست آورد. بر این اساس اختلاف پاسخ‌های جابه‌جایی سالم و آسیب‌دیده را برای تعداد نقاط یک سیگنال پاسخ به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$[ERV_i] = [(Thd_i)_h]_j - [(Thd_i)_d]_j \quad (۵)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, \dots, m$$

که  $ERV_i$  مقدار خطای هر حس گر است و  $(Thd_i)_h$  و  $(Thd_i)_d$  به ترتیب مقادیر پاسخ‌های تاریخچه زمانی جابه‌جایی در حالت سالم و آسیب‌دیده برای هر حس گر می‌باشد. اندیس  $i$  تعداد حس گرها و  $j$  تعداد نقاطی هستند که در یک پاسخ تفاوت آنها محاسبه می‌شود.

سپس مقدار تابع چگالی احتمال نرمال  $G(x)$  برای هر مقدار خطا در هر حس گر محاسبه می‌شود. تابع  $G(x)$  مقدار تابع چگالی احتمال هر مقدار متغیر  $x$  را از طریق توزیع نرمال با میانگین  $\mu$  و انحراف استاندارد  $\sigma$  به صورت یک بردار ماتریس با اندازه و مقدار مشخص برای یک سیگنال واقعی به دست می‌آورد. در واقع مقدار ورودی با همان بعد اولیه به صورت خروجی در قالب تابع توزیع احتمال به دست می‌آید. پارامتر  $\sigma$  نیز باید مثبت باشد.

در هر طبقه یک سقف مطابق مرجع [۲۶] وجود دارد. دو مدل المان محدود در این سازه برای تولید پاسخ‌های شبیه‌سازی شده وجود دارد که مدل اول، یک سازه ۱۲ درجه آزادی برشی می‌باشد که قیدها در همه حرکت‌ها مقید شده‌اند به جز درجات آزادی انتقالی در راستای محور  $x$  و  $y$  و درجه آزادی دورانی  $\theta$  برای هر طبقه که فعال نگه داشته شده و سایر درجات بسته می‌باشند. مدل دوم هم به صورت مدل ۱۲۰ درجه آزادی می‌باشد که تنها گره‌های طبقه را نیاز دارد و همان درجات آزادی را نیز در این مدل دارد.

تیرها و ستون‌های طبقات به صورت مدل تیرهای اویلر برنولی در هر دو المان محدود مدل شده‌اند. همچنین مهاربندها به صورت میله هستند که سختی خمشی ندارند. یک شکل مدل تحلیلی از سازه ASCE در شکل (۱) نشان داده شده است. بر اساس شکل مذکور محل حس گره‌های موجود بر روی سازه به مختصات مشخص در جدول (۱) مشخص می‌باشد. به همین ترتیب از حس گره‌های ۵ تا ۱۶ دقیقاً بر اساس مختصات طبقه اول، برای طبقات دوم تا چهارم نصب شده است.

جدول (۱): موقعیت حس گره‌ها در سازه شاخص.

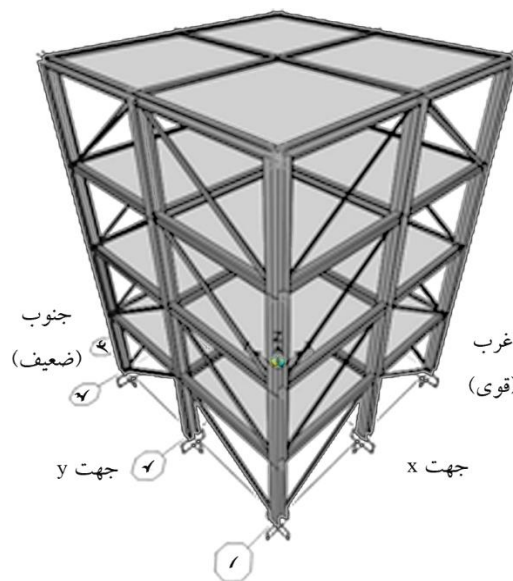
شماره حس گر	موقعیت جانمایی
۱	طبقه اول در جهت $x$ (۰، ۱/۲۵)
۲	طبقه اول در جهت $y$ (۱/۲۵، ۲/۵)
۳	طبقه اول در جهت $x$ (۱/۲۵، ۲/۵)
۴	طبقه اول در جهت $y$ (۰، ۱/۲۵)

نتایج حاصل از مدل‌سازی به صورت کامل در کد نویسی متلب تولید شده و توسط کارگروه سازه ASCE موجود می‌باشد [۴۳]؛ که در این تحقیق به منظور بررسی پاسخ‌های جابه‌جایی علاوه بر استفاده از کدهای متلب تولید شده، مدل تحلیلی بر اساس مشخصات ارائه شده در برنامه SAP2000 شبیه‌سازی شده است. همچنین به منظور صحت‌سنجی مدل ایجاد شده با مدل حاصل از کد متلب، نتایج مودهای فرکانسی با یکدیگر مقایسه شده است. به منظور نزدیکی نتایج، نیروی تحریکی در مدل برنامه SAP2000 اعمال می‌شود. شایان ذکر است این نیرو همان نیروی ارتعاشی تصادفی اعمال شده در کد متلب [۲۷] می‌باشد.

روش‌های تعیین آسیب می‌باشد. سازه شاخص ASCE داده‌های پاسخ سازه‌ای از یک سازه دو دهانه در هر جهت، چهار طبقه فولادی و پلان مربعی شکل می‌باشد [۳۲]. فاز I مطالعه این سازه به وسیله مدل‌سازی المان محدود شامل سطوح مختلف آسیب می‌باشد. فاز II شامل دو بخش می‌باشد: ۱- بخش مدل‌سازی داده‌ها و ۲- بخش مدل‌سازی آزمایشگاهی می‌باشد که داده‌ها در بخش اول فاز دوم به وسیله مدل‌سازی المان محدود دینامیکی سازه‌ها تحت برنامه متلب می‌باشد [۳۳]. برای فاز یک مطالعه سازه (مدل‌سازی المان محدود) به [۳۴-۳۷] و فاز دوم آن به [۳۸-۴۲] می‌توان اشاره نمود. با توجه به دسترس بودن فاز اول و نتایج بهتر، مقالات بیشتری در فاز اول صورت گرفته است.

#### ۵-۱- مشخصات سازه و فاز اول در مطالعه سازه ASCE

سازه نشان داده شده در شکل (۱) یک سازه چهار طبقه قاب فولادی دو دهانه- دو دهانه که به صورت ۱/۳ مدل سازه در آزمایشگاه تحقیق مهندسی زلزله در دانشگاه بریتیش کلمبیا (UBC) مدل شده است. ابعاد آن در پلان به صورت ۲/۵ در ۲/۵ متر و ارتفاع آن ۳/۶ متر می‌باشد. مقاطع به صورت غیرواقعی و برای یک مدل مقیاسی با مشخصاتی که در جدولی در مرجع [۲۶] ارائه شده، می‌باشند. در هر طبقه برای هر قاب دو عدد مهاربند قطری وجود دارد که ممکن است برای ارزیابی آسیب حذف شوند.



شکل (۱): دیاگرام مدل تحلیلی با جهات قوی و ضعیف.

## ۶- الگوهای آسیب

با توجه به سازه بدون آسیب، در این مقاله سه الگوی آسیب به عنوان آسیب در مسئله شاخص مطرح شده مورد مطالعه قرار گرفته است. این الگوهای آسیب از آسیب‌های با مقدار شدت کم تا آسیب‌های شدید می‌باشند. الگوهای آسیب به صورت مستقیم برای نشان دادن پیچیدگی مکانیسم‌های آسیب طراحی شده، اما می‌تواند برای توانایی روش‌های مختلف پایش سلامت سازه به منظور شناسایی محل آسیب و شدت آن مورد آزمایش قرار گیرد. الگوهای آسیب مورد بررسی در جدول (۲) و مرجع [۲۷] بیان شده است.

با توجه به آسیب‌های مذکور برای از بین بردن مقدار سختی در هر المان با توجه به حالت آسیب، المان‌های مذکور در هر حالت حذف شده‌اند. هدف اصلی این مقاله تعیین طبقات دارای آسیب در همه الگوهای آسیب و علاوه بر آن تعیین محل آسیب در حس گرها در حالت آسیب iii می‌باشد.

جدول (۲): الگوهای آسیب موجود در سازه.

حالت آسیب	شرح آسیب
i	سختی در مهاربندهای طبقه اول موجود نیست
ii	سختی در مهاربندهای طبقه اول و سوم موجود نیست
iii	سختی در یکی از مهاربندهای طبقه اول موجود نیست

## ۷- نتایج

پیش از پردازش پاسخ‌های دینامیکی شتاب و جابه‌جایی بر اساس روش‌های بیان شده، با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته سازه ASCE در برنامه SAP2000 به منظور ارزیابی بین مشخصات دینامیکی سازه، مقایسه فرکانس‌ها در حالات مختلف نرم‌افزار SAP2000 و کد ارائه شده در متلب توسط کارگروه سازه ASCE صورت گرفته است. تمامی فرضیات با توجه به مرجع [۲۷] و همچنین بخش مدل‌سازی همین مقاله برای مدل ایجاد شده SAP2000 در نظر گرفته شده تا مودهای ارتعاشی نزدیک‌ترین مقادیر فرکانسی را به نتایج حاصل از کد متلب داشته باشند. در جدول (۳) مقایسه بین فرکانس‌های حاصل در حالات مختلف توسط نرم‌افزارهای SAP2000 و MATLAB نشان داده شده است. با توجه به جدول مقایسه نتایج نرم‌افزارهای SAP2000 و MATLAB برای حالت‌های الگوهای آسیب i و ii صورت گرفته است. از آنجایی که معمولاً مودهای اولیه سازه غالب هستند در اینجا چهار مود اول غالب از مجموع ۱۲ مود سازه در حالت سازه‌های سالم و آسیب‌دیده در مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزارهای SAP2000 و MATLAB دارای مقدار فرکانس نزدیک به هم تا ۹۰ درصد هستند.

جدول (۳): مقایسه فرکانس‌های طبیعی در حالت‌های نرم‌افزار و کد متلب.

شماره مود	فرکانس طبیعی (هرتز)											
	آسیب نوع ۲		آسیب نوع ۱				سازه سالم					
	MATLAB	SAP2000	MATLAB	SAP2000	MATLAB	SAP2000	MATLAB	SAP2000				
۱	Y	۵/۸۲	y	۵/۸۳	y	۶/۲۴	y	۶/۲۴	y	۹/۴۱	y	۹/۴۱
۲	X	۹/۵۱	x	۹/۲۶	x	۹/۹۱	x	۹/۸۵	x	۱۱/۷۹	x	۱۱/۷۹
۳	θ	۱۱/۰۲	θ	۹/۵۱	θ	۱۱/۷۳	θ	۹/۹۱	θ	۱۶/۳۹	θ	۱۳/۷۷
۴	Y	۱۴/۸۹	y	۱۴/۹۱	y	۲۱/۵۴	y	۲۱/۵۵	y	۲۵/۵۵	y	۲۵/۵۵
۵	X	۲۴/۹۲	x	۲۳/۸۵	x	۲۸/۹۳	x	۲۸/۹۴	x	۳۲/۰۲	x	۳۲/۰۱
۶	Y	۲۸/۴۲	θ	۲۴/۹۳	y	۳۷/۳۹	θ	۳۲/۱۰	y	۳۸/۶۸	θ	۳۷/۴۲
۷	θ	۳۶/۰۷	y	۳۶/۱۲	θ	۳۸/۲۹	y	۳۷/۴۰	θ	۴۴/۶۶	y	۳۸/۶۸
۸	Y	۴۱/۳۷	y	۴۱/۴۰	y	۴۷/۳۵	y	۴۷/۳۶	y	۴۸/۰۳	y	۴۸/۰۳
۹	X	۴۶/۸۱	x	۴۶/۸۵	x	۴۷/۸۵	x	۴۷/۸۵	x	۴۸/۴۶	x	۴۸/۴۶
۱۰	X	۵۴/۳۶	θ	۵۳/۴۳	x	۶۰/۰۲	θ	۵۴/۸۶	x	۶۰/۱۸	θ	۵۶/۶۲
۱۱	θ	۶۳/۶۷	x	۵۴/۴۰	θ	۶۵/۳۳	x	۶۰/۰۱	θ	۶۷/۵۱	x	۶۰/۱۷
۱۲	θ	۷۲/۶۴	θ	۶۱/۱۵	θ	۸۳/۳۵	θ	۷۰/۰۰	θ	۸۳/۶۶	θ	۷۰/۲۵



طبقات مورد نظر بر اساس الگوهای آسیب مقدار شاخص EDI هر طبقه به صورت مجزا با همدیگر جمع شده‌اند و در نهایت نتایج حاصل برای حالت‌های آسیب به صورت زیر رسم شده‌اند:

#### ۷-۱-۱- تعیین محل طبقات دارای آسیب بر اساس شاخص

##### انرژی فرکانس آبی EDI

در شکل (۳) مقدار EDI برای حالت‌های آسیب ii و iii رسم شده است. بر اساس حالت آسیب i بخش A از شکل (۳) که سختی برای المان‌های مهاربند صفر می‌باشد و در واقع المان‌های مهاربند حذف شده‌اند، تأثیر آن بر روی طبقه اول سازه بیشتر از طبقات دیگر خواهد بود. به همین خاطر مقدار EDI در طبقه اول بیشتر از باقی طبقات می‌باشد که نشان‌دهنده تغییرات سختی و مشخصات دینامیکی سازه در طبقه اول است. پس محل آسیب در طبقه اول کاملاً مشخص می‌باشد و به ترتیب طبقات دوم، سوم و چهارم به دلیل حذف المان مهاربند طبقه اول مقدار انرژی کمتری را نیز دریافت کرده‌اند. در بخش B از شکل (۳) مقدار EDI برای حالت آسیب ii رسم شده که مقدار شاخص EDI در طبقات اول و سوم بیش از طبقات دیگر می‌باشد. با توجه به حالت آسیب دوم سختی المان‌های مهاربند طبقات اول و سوم صفر می‌باشد، مسلماً تأثیر این آسیب به دلیل حذف المان‌های مهاربندی و کاهش مشخصات دینامیکی سازه در طبقات اول و سوم بیشتر خواهد بود.

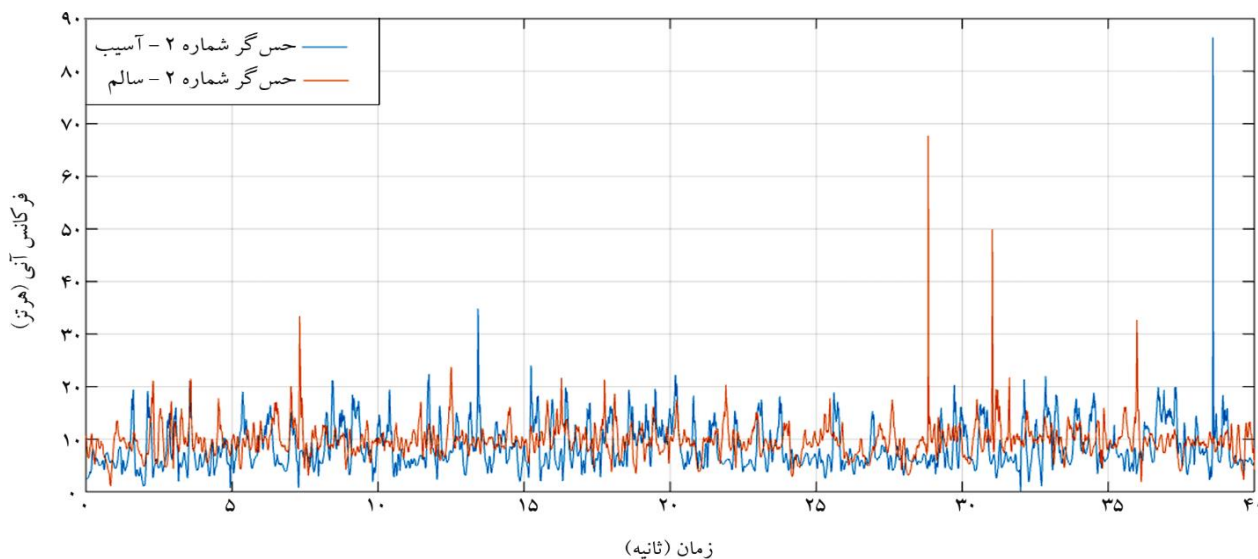
نکته قابل توجه آن است که مودهای فرکانسی که در مقابل یکدیگر قرار دارند لزوماً مربوط به یک جهت ارتعاشی در سازه نمی‌باشند. لذا برای مقایسه بین آنها این نکته مهم خواهد بود. به همین منظور جهت مودهای ارتعاشی در هر فرکانس در داخل پرانتز نشان داده شده است. نکته دیگر آن است که مدل سازه آسیب‌دیده را می‌توان به سادگی با حذف المان و یا کاهش سختی المان‌های بیان شده در برنامه شبیه‌سازی ایجاد کرد.

پس از این مرحله برای پردازش پاسخ‌های دینامیکی سازه بر اساس تبدیل HHT پاسخ‌های شتاب و جابه‌جایی همه حس‌گرها در برنامه MATLAB حاصل شده‌اند. فرکانس آبی همه حس‌گرها از تبدیل HHT به دست آمده که در شکل (۲) فرکانس آبی حس‌گر شماره ۲ در حالت‌های سالم و حالت آسیب ii رسم شده است. بر اساس شکل فرکانس آبی حس‌گر شماره ۲ در حالت آسیب‌دیده در سطحی پایین‌تر از مقادیر فرکانس آبی در حالت بدون آسیب می‌باشند.

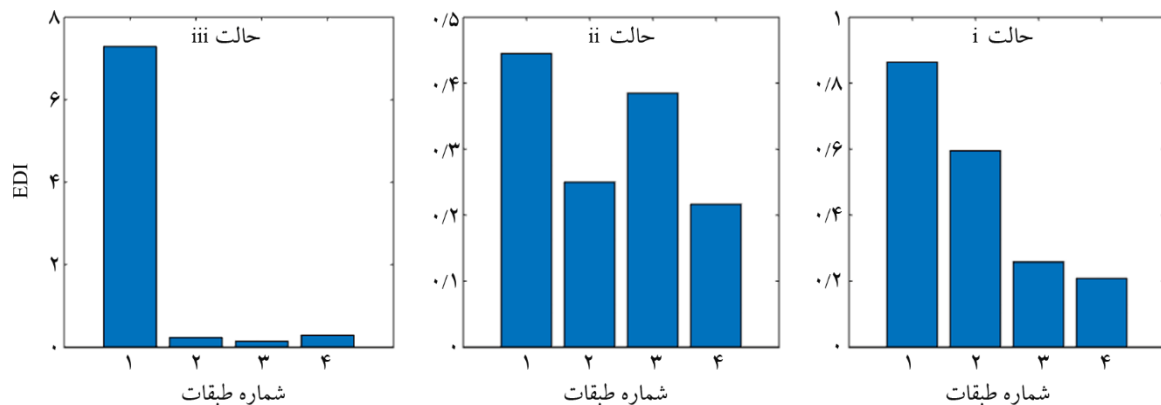
#### ۷-۱-۲- تعیین محل آسیب بر اساس شاخص انرژی فرکانس آبی

##### EDI

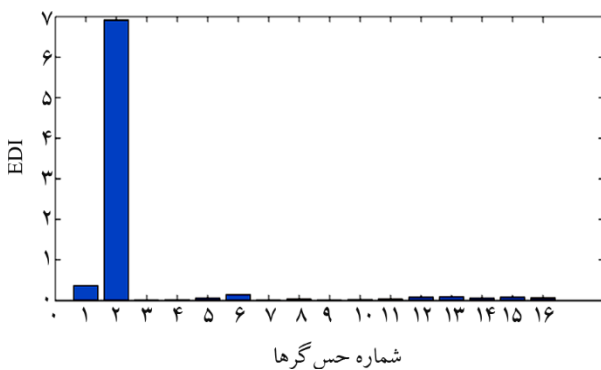
بر اساس توضیحات در بخش (۴-۱) مقدار EDI برای همه حس‌گرها محاسبه شده است. برای هر طبقه چهار حس‌گر و چهار شاخص EDI به دست آمده است. برای ارزیابی و تعیین آسیب در



شکل (۲): فرکانس آبی حس‌گر شماره ۲ برای حالت سالم و حالت آسیب ii.



شکل (۳): مقدار شاخص EDI برای هر طبقه در حالت آسیب‌های i، ii و iii.



شکل (۴): مقدار شاخص EDI برای هر حس گر در حالت‌های آسیب iii، iv و v.

بر اساس نتایج حاصل از شاخص انرژی، با توجه به اینکه شاخص EDI با حذف کامل سختی در المان‌ها مشخص‌تر، محل آسیب را تعیین می‌کند، زمانی که یک آسیب به صورت جزئی در المانی حاصل شود این روش از قابلیت کمتری برای تعیین آسیب برخوردار می‌باشد و این رفتار آسیب‌شناسی برای شاخص انرژی برای الگوهای آسیب به دور از ذهن نبوده است؛ زیرا با توجه به تغییرات سختی و رابطه  $F = m\ddot{a} = k\Delta$  در روش انرژی فقط بحث پاسخ شتاب در نظر گرفته شده و آسیب‌های بیان شده مربوط به شتاب بوده و انرژی آن حاصل شده است. بر این اساس نیاز به یک روش تعیین آسیب بر پایه پاسخ‌های جابه‌جایی نیز وجود خواهد داشت که در بخش بعدی برای الگوهای آسیب بیان شده است [۴۳].

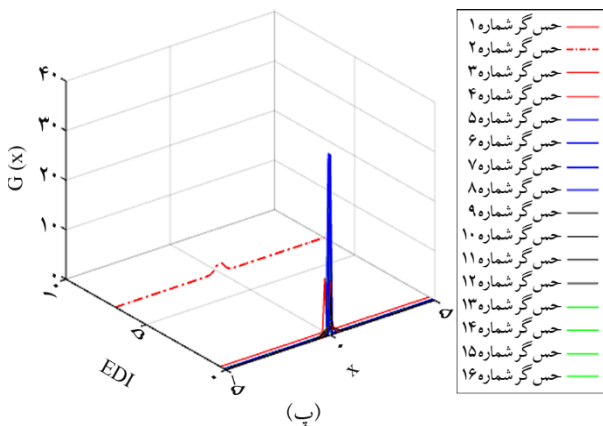
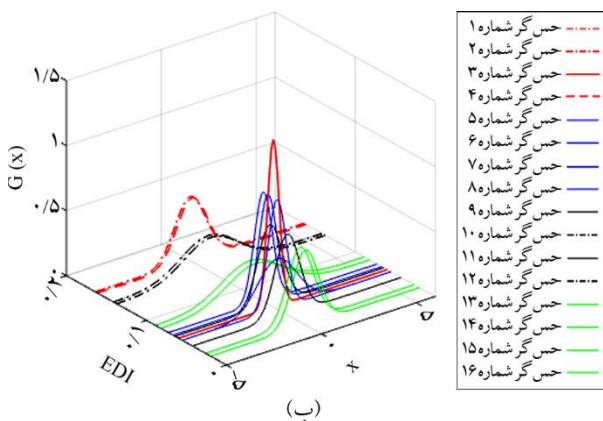
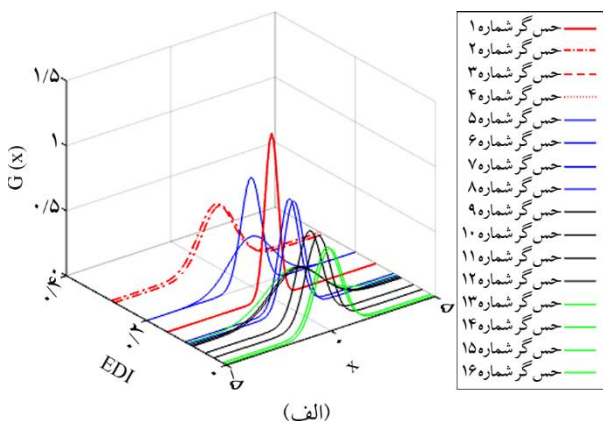
**۲-۷- تعیین محل آسیب با استفاده از شاخص آسیب جابه‌جایی**  
در این بخش الگوهای آسیب بیان شده مورد ارزیابی قرار

همان‌طور که در شکل مشخص است مقدار EDI در طبقات اول و سوم بیشتر است و محل آسیب با جذب انرژی بیشتر در طبقات اول و سوم مشخص شده است. در بخش C مقدار EDI برای حالت آسیب iii رسم شده است. بر اساس جدول (۲) حالت آسیب iii یکی از المان‌های مهاربندی در بخش شمالی در صفحه غربی نزدیک به حس گر شماره دو در طبقه اول حذف گردیده است. بر این اساس مقدار شاخص EDI به دلیل کاهش سختی المان مهاربند در طبقه اول باید بیشتر باشد. بر اساس شکل مقدار EDI برای طبقه اول به وضوح بیش از طبقات دیگر است و طبقات دوم، سوم و چهارم مقدار انرژی ناچیزی را دریافت کرده‌اند. بر اساس شکل نیز محل آسیب به دلیل مقدار EDI بیشتر در طبقه اول رخ داده است.

#### ۲-۱-۲- تعیین محل حس گرهای دارای آسیب بر اساس شاخص انرژی فرکانس آنی EDI

اما همان‌طور که بیان شده هدف در حالت آسیب iii علاوه بر تعیین طبقات آسیب‌دیده تعیین محل حس گر آسیب‌دیده نیز خواهد بود. به همین دلیل مقدار EDI برای تمامی حس گرها در شکل (۴) محاسبه شده است. در شکل (۴) در حالت آسیب iii مقدار انرژی دریافت شده در حس گر ۲ بیش از باقی حس گرها می‌باشد. با توجه به محل آسیب و حذف المان مهاربندی که در حالت آسیب iii و نزدیک حس گر ۲ می‌باشد، محل آسیب حس گرها در شکل (۴) به درستی تعیین شده است.

حس‌گرها دارد. بر این اساس می‌توان محل آسیب را در حس‌گر شماره ۲ در طبقه اول شناسایی کرد.



شکل (۵): منحنی ترکیب شاخص  $G(x)$  و EDI برای هر حس‌گر در حالت‌های آسیب i، ii و iii.

۲-۲-۲- تعیین محل آسیب با استفاده از شاخص قابلیت اعتماد

#### خطا $\beta$ و شاخص EDI

منحنی‌های شاخص  $\beta$  و شاخص EDI برای ارزیابی سریع‌تر در شکل (۶) برای حالت‌های آسیب نشان داده شده است.

گرفته و برای ارزیابی محل آسیب تعیین شده از پارامتر EDI و ارزیابی دقیق‌تر و همچنین در نظر گرفتن هم‌زمان پاسخ‌های شتاب و جابه‌جایی، تمامی مراحل با روش شاخص آسیب جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲-۱- تعیین محل آسیب با استفاده از شاخص تابع چگالی

#### احتمال نرمال $G(x)$ و شاخص EDI

پس از محاسبه تابع خطای حس‌گرها بر اساس بخش قبل، مقدار شاخص  $G(x)$  برای تمامی حس‌گرها محاسبه شده است. به منظور ارزیابی اولیه و تعیین محل آسیب، منحنی ترکیب شاخص  $G(x)$  و شاخص EDI در یک منحنی سه‌بعدی برای حالت‌های آسیب ii و iii ترسیم شده است. بر اساس شکل (۵) می‌توان شاخص  $G(x)$  و شاخص EDI را در یک منحنی بررسی نمود و تأثیر آنها را بر یکدیگر دید. در شکل (۵) منحنی‌های قرمز، آبی، مشکی و سبز به ترتیب مربوط به حس‌گرهای طبقه اول، دوم، سوم و چهارم می‌باشد. بر اساس حالت آسیب i، بخش A منحنی‌های قرمز رنگ (طبقه اول) مقدار انرژی و EDI بیشتری دارند. همچنین با توجه به شاخص  $G(x)$  آنها، حس‌گرهای موجود در طبقه اول دارای پراکندگی بیشتر و مقادیر میانگین و انحراف استاندارد بیشتری نسبت به بقیه حس‌گرها می‌باشند که نشان‌دهنده رخداد آسیب در طبقه اول است. در حالت آسیب ii در بخش B منحنی‌های قرمز رنگ (حس‌گرهای طبقه اول) و منحنی مشکی (طبقه سوم) دارای مقدار EDI بیشتر و مقدار پراکندگی بیشتر داده‌ها هستند. با توجه به حذف المان‌های مهاربندی در طبقات اول و سوم رخ داده، می‌توان دریافت که منحنی‌های موجود محل آسیب را به درستی مشخص کرده است. در بخش C برای حالت آسیب iii محل حالت آسیب سوم که نزدیک حس‌گر شماره دوم و در طبقه اول است، مسلماً مقدار پراکندگی داده‌ها باید کمتر و مقدار شاخص EDI در طبقه اول بیشتر باشد. با توجه به شکل، به وضوح مشخص است که یکی از حس‌گرهای طبقه اول (حس‌گر شماره دو) دارای EDI بیشتر است و همچنین دارای میانگین بیشتر می‌باشد و اختلاف بسیار زیادی نسبت به دیگر

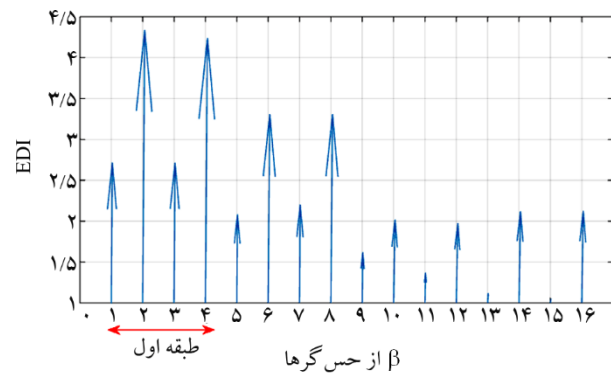
دلیل آن نیز مقدار پراکندگی کمتر در هر تابع خطای ERF می باشد که در نهایت به وضوح این اختلاف برای حس گرهای طبقه اول و سوم مشخص می باشد. بر این اساس محل آسیب نیز در این حالت تعیین شده است. در بخش C در حالت آسیب iii از ارزیابی سریع، مقدار انرژی حاصل شده در حس گر شماره دو برای شاخص  $\beta$  بسیار بیشتر از بقیه می باشد که بیانگر محل رخداد آسیب در این حس گر است.

بر اساس نتایج حاصل در این روش می توان ترکیب استفاده از پاسخ های شتاب و جابه جایی و در واقع استفاده هم زمان شاخص های انرژی و قابلیت اعتماد خطا را روشی قابل اطمینان تر برای ارزیابی محل آسیب در سازه های ساختمانی دانست.

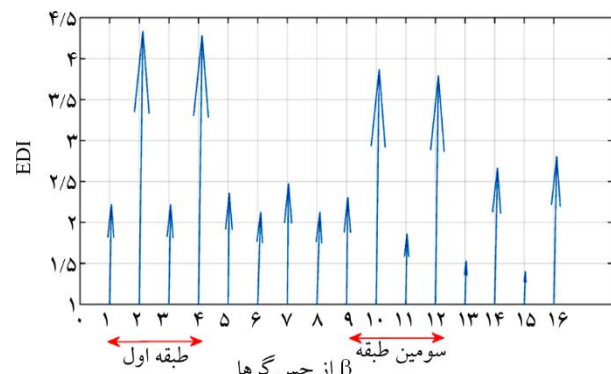
### ۷-۳- تشخیص محل آسیب در حالت آسیب جدید

در این بخش یک حالت آسیب با کاهش سختی جزئی تر و شدت آسیب کمتر، برای شناسایی محل حس گرهای آسیب دیده جهت ارزیابی بهتر روش ها و نیز قابلیت بالای روش ارائه شده، بررسی و محاسبه شده است و نتایج در شکل (۷) رسم شده است. حالت آسیب این بخش، در یکی از مهاربندهای موجود در محور ۷ در طبقه اول نزدیک حس گر دو و نیز در طبقه چهارم نزدیک حس گر ۱۴ در همان محور می باشد که کاهش سختی آسیب یکی از المان های مهاربندی در طبقات دوم و چهارم به مقدار ۵۰ درصد می باشد.

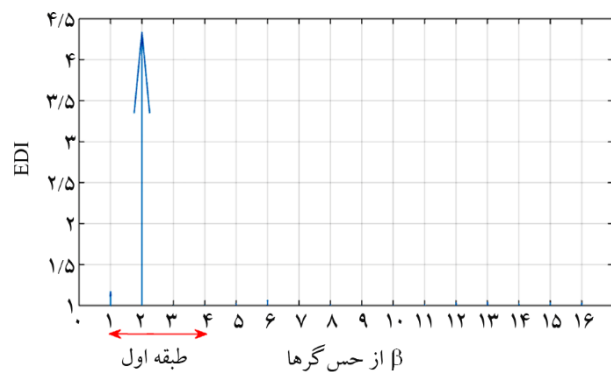
در شکل (۷-الف) طبقه دارای آسیب مطابق روش EDI محاسبه شده و در بخش (۷-ب) حس گر دارای آسیب که نزدیک به المان مهاری می باشد، محل آسیب را نشان می دهد. مطابق حالت آسیب این بخش، در منحنی شاخص EDI از شکل (۷-الف) مقادیر انرژی برای طبقات اول و چهارم زیاد می باشد که نشان دهنده آسیب در آن طبقات است. همچنین در شکل (۷-ب) منحنی ترکیبی شاخص  $\beta$  و EDI محل دقیق آسیب را در حس گرهای دوم و چهارم مشخص کرده که با توجه به کاهش سختی ۵۰ درصد یکی از المان های مهاری در طبقات اول و چهارم، محل آسیب به درستی تعیین شده است.



(الف)



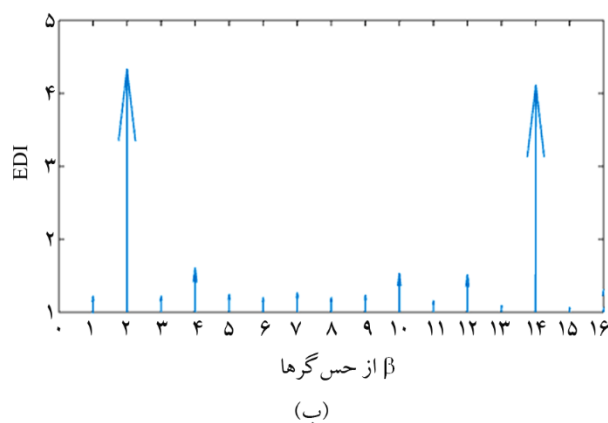
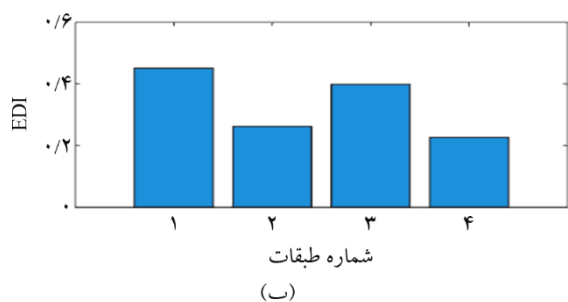
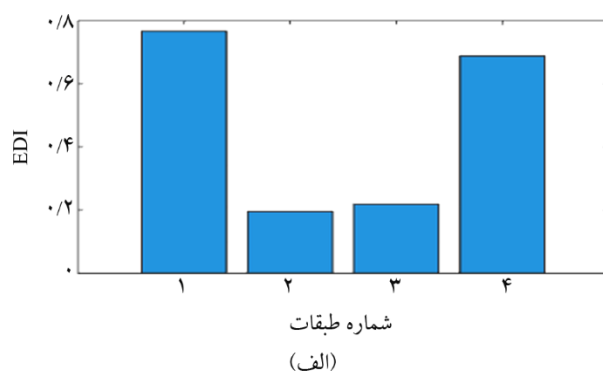
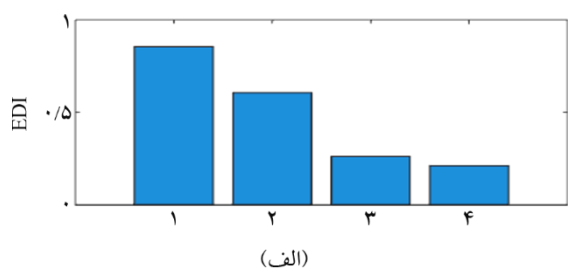
(ب)



(پ)

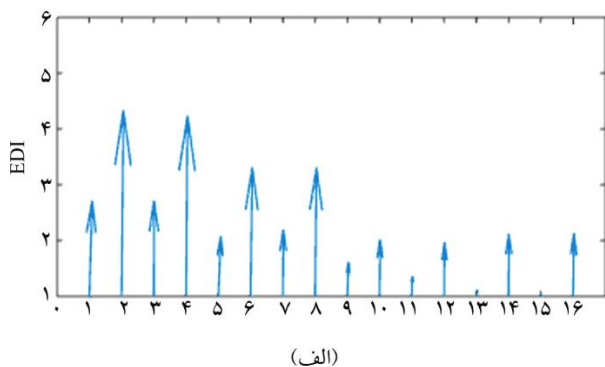
شکل (۶): منحنی شاخص  $\beta$  و EDI برای هر حس گر در حالت های آسیب i، ii و iii.

در بخش A از شکل (۶) برای حالت آسیب i، مقادیر حاصل برای حس گرهای طبقه اول بیشتر از طبقات دیگر می باشد، همچنین بر اساس پراکندگی کمتر و میانگین بیشتر و همچنین مقدار انرژی فرکانس آنی بیشتر در حس گرهای طبقه اول می توان دریافت که محل آسیب در طبقه اول رخ داده است. در بخش B در حالت آسیب iii، مقادیر EDI در حس گرهای طبقه اول و سوم برای هر شاخص  $\beta$  بیشتر از بقیه حس گرها می باشد.

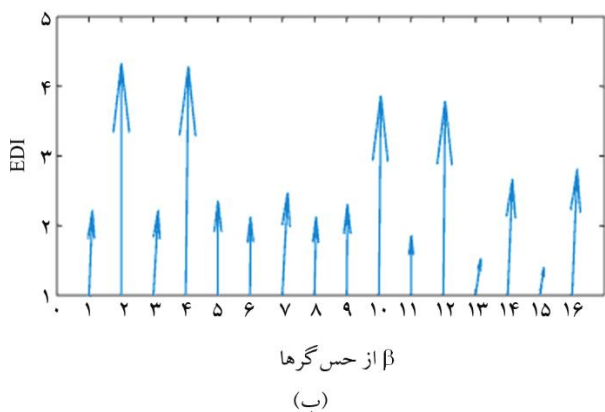


شکل (۸): منحنی شاخص EDI برای هر طبقه در حالت آسیب i و ii همراه با ۵ درصد نوفه.

شکل (۷): (الف) منحنی شاخص EDI برای طبقات و (ب) منحنی شاخص β و EDI برای هر حس گر در حالت آسیب جدید.



## ۷-۴- تشخیص محل آسیب در مدل ASCE همراه با نوفه



شکل (۹): منحنی شاخص β و EDI برای هر حس گر در حالت آسیب i و ii همراه با ۵ درصد نوفه.

معمولاً سیگنال‌های پاسخ بدون آلودگی نوفه نیستند و به دلایل خاصی مانند نحوه اندازه‌گیری، خطاهای انسانی، ارتعاشات محیطی و... ایجاد می‌شوند. به همین دلیل به پاسخ‌های دینامیکی شتاب و جابه‌جایی در حالت‌های آسیب i و ii مقدار ۵ درصد نوفه سفید اضافه شده و در ادامه تعیین محل آسیب همراه با نوفه صورت گرفته است. در شکل (۸) شاخص EDI برای تعیین آسیب در حالت آسیب i و ii سازه ASCE همراه با نوفه ۵ درصد محاسبه شده است. بر اساس شکل (۸-الف) حالت آسیب i مقدار انرژی فرکانس آبی محاسبه شده برای حس گر طبقه اول بیشتر از طبقات دیگر است. با توجه توضیحات ارائه شده محل آسیب در طبقه اول بوده است. همچنین در شکل (۸-ب) مقدار شاخص EDI طبقه اول و سوم بیشتر است و با توجه به حالت آسیب ii محل آسیب در طبقات اول و سوم می‌باشد.

در شکل (۹) شاخص β در برابر شاخص EDI برای هر دو حالت آسیب i و ii همراه با نوفه ۵ درصد محاسبه شده است. بر اساس نتایج در شکل (۹-الف) مقدار شاخص قابلیت اعتماد

جابه‌جایی استفاده شده است. هدف اصلی در نظر گرفتن دو روش بیان شده در کنار یکدیگر و ارزیابی هم‌زمان آن‌ها بوده است. همچنین به منظور در نظر گرفتن نوفه‌های اندازه‌گیری مقادیر نوفه ۵ درصد به پاسخ‌ها اضافه شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند. می‌توان به صورت کلی نتایج موجود در این مقاله را به شرح زیر بیان نمود:

۱. با توجه به نوآوری در روش ارائه شده برای تشخیص آسیب، در روش انرژی فرکانس آنی و شاخص آسیب جابه‌جایی محل آسیب در طبقات برای حالت‌های آسیب ii و iii به درستی تعیین شده است.

۲. بر اساس نتایج ارائه شده محل حس‌گر المان‌های آسیب‌دیده در حالت‌های آسیب iii به درستی مشخص شده است.

۳. محل آسیب در الگوی آسیب جدید (آسیب با شدت کمتر) به درستی تعیین شد.

۴. محل آسیب در الگوهای آسیب i و ii همراه با ۵ درصد نوفه به درستی تعیین شدند.

۵. بر اساس نتایج حاصل از شاخص انرژی با توجه به اینکه شاخص EDI با حذف کامل سختی در المان‌ها مشخص‌تر محل آسیب را تعیین می‌کند. لذا برای آسیب‌های جزئی‌تر، نیاز به یک روش تعیین آسیب بر پایه پاسخ‌های جابه‌جایی وجود خواهد داشت که در این مقاله کاربرد هم‌زمان پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب نتایج مناسبی را به همراه داشته است. مطابق نتایج به دست آمده، با استفاده از روش‌های ترکیبی و در نظر گرفتن انرژی شتاب و شاخص قابلیت اعتماد خطای جابه‌جایی، می‌توان محل آسیب‌دیده و حتی طبقه دارای آسیب را به درستی تعیین نمود و برای تعیین محل دقیق خود المان آسیب‌دیده باید محل حس‌گرگذاری‌ها تغییر پیدا کرده، یا حتی زیاد شود و همچنین نوع آسیب به صورت کاهش کم سختی نباشد.

## مراجع

- Pierdicca, A., Clementi, F., Maracci, D., Isidori, D., and Lenci, S. (2016) Damage detection in a precast structure subjected to an earthquake: A numerical approach. *Engineering Structures*, **127**, 447-458.

خطا در حس‌گرهای طبقه اول مقدار انرژی بیشتری را دارند و در شکل (۹-ب) مقدار شاخص  $\beta$  در حس‌گرهای طبقه اول و سوم مقدار انرژی بیشتری دریافت کرده و برای هر دو حالت آسیب محل آسیب به درستی مشخص شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده می‌توان نوآوری روش‌های ارائه شده در این مقاله را استفاده از پاسخ‌های دینامیکی شتاب و جابه‌جایی به صورت هم‌زمان دانست. به عبارتی نتایج نشان دادند که ترکیب منحنی‌های انرژی و پارامترهای قابلیت اعتماد خطا در کنار یکدیگر کمک مهمی به تعیین محل آسیب سریع‌تر و همچنین صحت‌سنجی روش انرژی دارد.

## ۸- نتیجه‌گیری

سیستم‌های پایش سلامت سازه که توانایی پیش‌بینی و تخمین محل آسیب را در سازه‌ها داشته باشد می‌تواند تأثیرات اقتصادی، ایمنی و بهره‌برداری مناسبی در طول عمر یک سازه رقم بزند. در واقع تعیین محل آسیب در سازه و اقدام سریع و مناسب پس از حوادثی مانند: زلزله و ... امری ضروری است. همچنین مطالعات سازه‌های شاخص می‌توانند یک مبنای اولیه برای تحقیقات و کشف روش‌های پایش سلامت سازه و تعیین محل آسیب باشد. در این مقاله روش نوینی برای تعیین محل آسیب در طبقات و المان‌های سازه در فاز اول مطالعه سازه شاخص ASCE ارائه شد. این سازه بر اساس پاسخ‌های تاریخچه زمانی شبیه‌سازی شده یک قاب ساختمانی مقیاس شده در آزمایشگاه می‌باشد و از مدل‌های المان محدود ۱۲ درجه آزادی برای تولید پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ای استفاده شده است. به منظور استفاده از پاسخ‌های شتاب و خصوصاً جابه‌جایی‌های سازه، مدل سازه ASCE در برنامه SAP2000 شبیه‌سازی شده و برای ارزیابی مدل ایجاد شده با مدل حاصل از کد متلب ارائه شده توسط کارگروه سازه ASCE، ارتعاش وارده به مدل عیناً همان نیروی موجود در برنامه MATLAB بوده است. در بخش اول تشخیص آسیب با استفاده از روش انرژی فرکانس آنی و پاسخ‌های شتاب سازه بوده است. در بخش دوم به منظور ارزیابی روش اول و در نظر گرفتن ترکیب پاسخ‌های شتاب و جابه‌جایی از شاخص آسیب

- Monitoring, and Performance Evaluation*. CRC Press.
13. 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.
  14. 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.
  15. Khosraviani, M.J., Bahar, O., and Ghasemi, S.H. (2020) Damage detection in continuous deck bridges using statistical cross-correlation function method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
  16. Mallat, S. (1999) *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Elsevier.
  17. Sifuzzaman, M., Islam, M.R., and Ali, M.Z. (2009) Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform.
  18. Huang, N.E. (2014) Introduction to the Hilbert–Huang transform and its related mathematical problems. In *Hilbert-Huang Transform and its Applications*, 1-26.
  19. Huang, N.E., Salvino, L.W., Nieh, Y.Y., Wang, G., and Chen, X. (2013) ‘HHT-based structural health monitoring’. In *Health Assessment of Engineered Structures: Bridges, Buildings and other Infrastructures*, 203-240.
  20. 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 and Structural Dynamics*, **32**(9), 1443-1467.
  21. 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.
  22. 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.
  2. Knitter-Piatkowska, A., Garbowski, T., and Garstecki, A. (2013). Damage detection through wavelet transform and inverse analysis. In *VI International Conference on Adaptive Modelling and Simulation (ADMOS 2013)*, 389-400.
  3. Yang, Z., Wang, L., Wang, H., Ding, Y., and Dang, X. (2009) Damage detection in composite structures using vibration response under stochastic excitation. *Journal of Sound and Vibration*, **325**(4-5), 755-768.
  4. Huo, L.S., Li, X., Yang, Y.B., and Li, H.N. (2016) Damage detection of structures for ambient loading based on cross correlation function amplitude and SVM. *Shock and Vibration*, Article ID 3989743, 12p., <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3989743>.
  5. Yan, Y.J., Cheng, L., Wu, Z.Y., and Yam, L.H. (2007) Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**(5), 2198-2211.
  6. Melhem, H. and Kim, H. (2003) Damage detection in concrete by Fourier and wavelet analyses. *Journal of Engineering Mechanics*, **129**(5), 571-577.
  7. Whitham, G.B. (2011) *Linear and Nonlinear Waves*. **42**, John Wiley & Sons.
  8. Hera, A. and Hou, Z. (2004) Application of wavelet approach for ASCE structural health monitoring benchmark studies. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), 96-104.
  9. Cantero, D. and Basu, B. (2015) Railway infrastructure damage detection using wavelet transformed acceleration response of traversing vehicle. *Structural Control and Health Monitoring*, **22**(1), 62-70.
  10. Tang, J.P., Chiou, D.J., Chen, C.W., Chiang, W.L., Hsu, W.K., Chen, C.Y., and Liu, T.Y. (2011) Retracted: a case study of damage detection in benchmark buildings using a hilbert-huang transform-based method. *Journal of Vibration and Control*, **17**(4), 623-636.
  11. Yang, J.N., Lei, Y., Lin, S., and Huang, N. (2004) Hilbert-Huang based approach for structural damage detection. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), 85-95.
  12. Huston, D. (2010) *Structural Sensing, Health*

- Monitoring of a benchmark structure for damage identification. *Proceedings of the Engineering Mechanics Speciality Conference*, Austin, TX.
35. Lam, H.F., Katafygiotis, L.S., and Mickleborough, N.C. (2004) Application of a statistical model updating approach on phase I of the IASC-ASCE structural health monitoring benchmark study. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), 34-48.
  36. Caicedo, J.M., Dyke, S.J., and Johnson, E.A. (2004) Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), 49-60.
  37. Wu, J.R. and Li, Q.S. (2006) Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element model updating method. *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(3), 231-239.
  38. Hou, Z. and Hera, A. (2002) Progress of phase II study of the ASCE health monitoring benchmark data using wavelet approach. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, USA, Columbia University.
  39. Hera, A. and Hou, Z. (2003) Wavelet approach for damage detection using experimental data of ASCE benchmark study. *Proceedings of the ASCE Engineering Mechanics Conference*.
  40. Casciati, S. (2004) Statistical models comparison for damage detection using the ASCE benchmark. *Proc. of Second European Workshop on Structural Health Monitoring*, 695-702.
  41. Zimmerman, D.C., Simmermacher, T., and Kaouk, M. (1995, February) Structural damage detection using frequency response functions. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 179-179.
  42. Nair, K.K., Kiremidjian, A.S., and Law, K.H. (2006) Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structure. *Journal of Sound and Vibration*, **291**(1-2), 349-368.
  43. Than Soe, M. (2013) *Vibration-Based Finite Element Model Updating and Structural Damage Identification* (Doctoral Dissertation, University of Greenwich).
  23. Khosraviani, M.J., Bahar, O., and Ghasemi, S.H. (2019) Damage detection in continues bridge deck and ASCE benchmark via instantaneous energy method. In: *8<sup>th</sup> International Conference of Seismology and Earthquake Engineering (SEE8)*. Tehran, Iran, IIEES.
  24. Kourehli, S.S. (2017) Damage diagnosis of structures using modal data and static response. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **61**(1), 135-145.
  25. Papoulis, A. (1977) *Signal Analysis*. **191**, New York: McGraw-Hill.
  26. 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.
  27. Johnson, E.A., Lam, H.F., Katafygiotis, L.S., and Beck, J.L. (2004) Phase I IASC-ASCE structural health monitoring benchmark problem using simulated data. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(1), 3-15.
  28. Proakis, J.G. and Manolakis, D.G. (1996) *Digital Signal Processing*. 3, New Jersey, Prentice Hall.
  29. Ogata, K. (1995) *Discrete-Time Control Systems*. 2, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
  30. Nowak, A.S. and Collins, K.R. (2012) *Reliability of Structures*. CRC Press.
  31. Ghasemi, S.H. and Nowak, A.S. (2017) Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state. *Engineering Structures*, **152**, 226-237.
  32. Dyke, S.J., Bernal, D., Beck, J.L., and Ventura, C. (2001) An experimental benchmark problem in structural health monitoring. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring*, 488-497, CRC Press.
  33. Johnson, E.A., Lam, H.F., Katafygiotis, L.S., and Beck, J.L. (2001) A benchmark problem for structural health monitoring and damage detection. *Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering*, 317-324.
  34. Dyke, S.J., Caicedo, J.M., and Johnson, E.A. (2000)



**واژه‌نامه**

Local	۱- موضعی
Global	۲- جامع
Global Structural Damage Detection Method (GSDM)	۳- تشخیص آسیب
Winger-Vill Transform	۴- تبدیل وینگر-ویل
Emprical Mode Decomposition (EMD)	۵- تجزیه مودی تجربی
Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)	۶- تجزیه مودی تجربی گروهی
Engensystem Realization Algorithm (ERA)	۷- الگوریتم پیاده‌سازی سیستم ویژه
Hilbert Transofrm (HT)	۸- تبدیل هیلبرت

## Damage Detection by Energy and Displacement Damage Index on the Analytical Phase of ASCE Benchmark

Mohammad Javad Khosraviani<sup>1</sup>, Omid Bahar<sup>2\*</sup>, and Seyed Hooman Ghasemi<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate of Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
2. Assistant Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran,  
\*Corresponding Author, email: [omidbahar@iiees.ac.ir](mailto:omidbahar@iiees.ac.ir)
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Identification of the modal parameters of the damaged structure by signal processing of vibration based on changes in dynamic properties such as frequency, stiffness, and mode shape of structures. Some of these approaches fail when applied to civil engineering structures, the main reasons are the low sensitivity of the structural response to the damage location, or the low accuracy of structural response obtained by installed sensors. However, due to the rigorous evaluation and low cost of signal processing methods, this method has made a great progress. Signal processing methods have been extensively employed to examine the measured system responses and determine system variations. These methods include Fourier analysis, wavelet transform and Hilbert-Huang transform.

During the last decades, the number of vibration-based damage detection methods has been greatly developed and has influenced much of the research. The purpose of these methods is to determine the resulting changes in the modal characteristics of the structure including its natural frequency, mode shape, and damping ratio. For example, the basis of the Fourier transform method is to determine the structural modal parameters from the random vibration data in the frequency range. However, time-frequency analysis is introduced to overcome the limitations of the Fourier method, the most important of which is not providing a frequency-time range of a signal. The first case of frequency-time analysis was the short-time Fourier transform method based on the Fourier transform of the data divided by the time window function. According to this method, the interaction between time and frequency is difficult due to the existence of the time window function. If the windows are smaller in the time segment, its accuracy increases, and in the frequency domain it becomes less accurate.

Several damage detection methods have been proposed based on the vibration signal of structures. In most of them, a damage index has been described as the difference between damage and undamaged structure. This paper intends to propose a damage detection method based on the amplitude coefficient correlation of damaged and undamaged responses of structures, while a signal decomposes to IMFs and the changes appear in the first IMF. Therefore, every change on the original signal can be revealed on IMFs, since the original signal depends on IMFs. Also, these changes have an effect on the analytical signal and the Hilbert transform. The instantaneous frequency is measured joints on the structure is calculated by the Hilbert transform of the first IMF of response. Then, by introducing the instantaneous frequency energy (EDI), the location of damages are detected. To assess the feasibility and reliability of the proposed method, the ASCE benchmark problem has been used. To consider the robustness of the proposed method, contamination of signals during the data acquisition process is investigated. The ASCE benchmark study is carried out by the International Association (IAS) ASCE Structural Health Monitoring Task Group. The dynamic responses of the structure have been obtained by numerical analysis under random vibration loading. To evaluate the HHT method, it is required to attain the damaged responses of the ASCE benchmark. The first five damage patterns of the ASCE benchmark building is used. Then the damage on the structure is detected with a comparison of damage and undamaged dynamic responses. According to the measured noise levels, dynamic responses to noise values have been contaminated and the results have been evaluated. According to the results, this method can trace the location of the damage by the energy of instantaneous frequency.

Therefore, the locations of damages in different scenarios were located with the EDI index and velocity vector. The results show that the proposed method determined the location of damage with the acceptable accuracy for low and moderate damage in damage scenarios.

**Keywords:** Damage detection, Structural health monitoring, HHT method, Instantaneous Frequency Energy Index.