

Damage Detection in Shear-Frame Using a Hybrid Criteria of Continuous Wavelet Transform and Entropy Measures

Rana Emaeilzadegan¹, Amin Gholizad^{2*}, Mona Shoaee-parchin³

1- M.Sc. Student of Structural Engineering, Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3- Ph.D. Candidate of Structural Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

This study presents a methodology for damage detection in shear-frame structures under seismic excitations, based on a combined approach using the continuous wavelet transform and approximate, sample, and fuzzy entropy measures. Entropy is employed as a quantitative indicator of signal irregularity, enabling the assessment of structural changes caused by damage. First, the structural acceleration responses are mapped into the time–frequency domain using continuous wavelet transform with the Morlet mother wavelet, which facilitates the analysis of local signal features. Subsequently, wavelet-based entropy measures are computed across all scales for different damage scenarios and all floors, and damage events are identified by monitoring variations in the entropy-based damage indices. The performance of these measures in damage detection is also compared. To identify damage-sensitive modes, the equivalent frequencies of the wavelet scales are checked with the natural frequencies of the intact structure for each mode to find the effects of damage on the structure's vibrational modes. To evaluate the performance of the proposed method, a five-story shear-frame model is developed in MATLAB, and dynamic time-history analyses are performed under two earthquake records. The results indicate that damage leads to noticeable changes in entropy-based indices in specific frequency bands, which reflects increased irregularity in the structural dynamic behavior. The average of damage index based on sample entropy for the structure's floors is generally greater than the corresponding indices from approximate and fuzzy entropy, suggesting that sample entropy is more sensitive to damage-induced changes. Furthermore, the maximum differences between entropy values in the intact and damaged states occur in frequency bands close to the natural frequencies, enabling the identification of damage-sensitive modes. Moreover, sample entropy based on wavelet coefficients exhibits higher sensitivity to damage in the first mode across most damage scenarios, whereas approximate and fuzzy entropy measures show their highest sensitivity in the third mode.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 July 2025

Revise Date: 19 October 2025

Accept Date: 06 December 2025

Keywords:

Structural health monitoring

Signal processing

Wavelet transform

Entropy

Complexity

Morlet wavelet

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.535686.3776

*Corresponding author: Dr. Amin Gholizad

Email address: gholizad@uma.ac.ir

شناسایی آسیب در قاب برشی با استفاده از ترکیب تبدیل موجک پیوسته و معیارهای آنروپی

رعنا اسمعیل زادگان^۱، امین قلی زاد^{۲*}، مونا شعاعی پرچین^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

این پژوهش، شناسایی آسیب در قاب برشی تحت تحریکات لرزه‌ای را با روشی ترکیبی مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته و آنروپی تقریبی، نمونه و فازی ارائه می‌دهد. استفاده از آنروپی به عنوان معیاری برای کمی‌سازی بی‌نظمی سیگنال پاسخ سازه امکان سنجش تغییرات ناشی از آسیب را فراهم می‌کند. ابتدا پاسخ‌های شتاب سازه با تبدیل موجک پیوسته با موجک مادر مورلت به حوزه زمان-فرکانس نگاشت می‌شوند تا تحلیل ویژگی‌های محلی سیگنال ممکن گردد. سپس، معیارهای آنروپی مبتنی بر ضرایب موجک در هر مقیاس برای حالات مختلف آسیب و تمام طبقات محاسبه شده و رخداد آسیب با رصد تغییرات شاخص آسیب شناسایی و عملکرد آن‌ها از نظر دقت مقایسه می‌گردد. برای شناسایی مودهای حساس به آسیب، فرکانس‌های معادل مقیاس در موجک با فرکانس‌های طبیعی سازه سالم در هر مود تطبیق داده می‌شوند تا تأثیر آسیب بر مودهای ارتعاشی سازه مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، یک قاب برشی پنج طبقه در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی شده و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت دو رکورد زلزله انجام می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد وقوع آسیب منجر به تغییر شاخص‌های مبتنی بر آنروپی در برخی نواحی فرکانسی شده که بیانگر رشد بی‌نظمی در رفتار دینامیکی سازه می‌باشد. میانگین شاخص مبتنی بر آنروپی نمونه طبقات سازه در اغلب حالات آسیب بیشتر از آنروپی تقریبی و فازی است و توانایی بالاتری در آشکارسازی تغییرات ناشی از آسیب دارد. بیشترین اختلاف بین آنروپی‌ها در حالت سالم و آسیب‌دیده در محدوده فرکانسی نزدیک به فرکانس‌های طبیعی سازه سالم مشاهده می‌شود که امکان شناسایی مودهای حساس به آسیب را فراهم می‌کند. همچنین، آنروپی نمونه مبتنی بر ضرایب موجک معمولاً در مود اول حساسیت بیشتری نسبت به آسیب دارد، در حالی که آنروپی تقریبی و فازی بیشترین حساسیت خود را در مود سوم نمایش داده‌اند.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه، پردازش سیگنال، تبدیل موجک، موجک مورلت، آنروپی، پیچیدگی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.535686.3776	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.535686.3776	۱۴۰۵/۰۴/۳۱	۱۴۰۴/۰۹/۱۵	۱۴۰۴/۰۹/۱۵	۱۴۰۴/۰۷/۲۷	۱۴۰۴/۰۵/۰۲
*نویسنده مسئول: امین قلی‌زاد						
gholizad@uma.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ایمنی و قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها می‌تواند تحت تأثیر از دست رفتن یکپارچگی آن‌ها به دلیل زوال تدریجی یا بلایای طبیعی قرار گیرد. خرابی سازه‌ها بر اثر این عوامل نه تنها منجر به تلفات جانی شده، بلکه خسارات اقتصادی مستقیم و غیرمستقیمی را نیز به همراه دارد. چنین شرایطی ایجاب می‌کند که هرگونه آسیب سازه‌ای در سریع‌ترین زمان ممکن شناسایی شود تا از بروز حوادث فاجعه‌بار جلوگیری گردد. [۱، ۲]. با توجه به اهمیت این موضوع، در چند دهه گذشته، پایش سلامت سازه با استفاده از روش‌های مختلف شناسایی آسیب، به حوزه‌ای پرطرفدار در تحقیقات صنعتی و دانشگاهی تبدیل شده است. روش‌های مبتنی بر ارتعاشات سازه برای شناسایی آسیب از اهمیت بالایی برخوردارند، زیرا قادر به تشخیص آسیب به صورت آنالین و پیوسته هستند، می‌توانند هر قسمت از سازه موردنظر را نظارت کنند و از نظر اقتصادی در طولانی مدت مقرون به صرفه‌اند. سیگنال‌های ارتعاشی سازه اطلاعات زیادی درباره وضعیت سلامت سازه ارائه می‌دهند و بیشتر روش‌های شناسایی آسیب مبتنی بر ارتعاش، تلاش می‌کنند این اطلاعات مرتبط با آسیب را استخراج و تفسیر کنند [۳]. پردازش سیگنال بخش کلیدی هر سیستم پایش سلامت مبتنی بر ارتعاش است [۴، ۵]. تکنیک‌های پردازش سیگنال در حوزه‌های مختلف زمان، فرکانس و زمان-فرکانس انجام می‌شوند [۶]. تبدیل موجک یک روش محبوب حوزه زمان-فرکانس پردازش سیگنال در شناسایی آسیب است [۳، ۷].

مفهوم موجک به صورت نظری نخستین بار در سال ۱۹۸۰ توسط زمین‌لرزه‌شناس فرانسوی، جین مورلت^۱ معرفی شد [۸]. نیولند^۲ نخستین کسی بود که از تحلیل موجک برای بررسی ارتعاشات ساختمان‌ها ناشی از قطارهای زیرزمینی و ترافیک جاده‌ای بهره برد و به این وسیله شباهت‌های میان سیگنال‌های پاسخ در هر طبقه سازه را کشف کرد [۹]. اسماعیل‌زاده و همکاران [۱۰]، با مدل‌سازی اجزای محدود سد پلین فلت^۳، آسیب را از طریق کاهش مدول الاستیسیته شبیه‌سازی کرده و پاسخ سازه در برابر زلزله نورتیج را بررسی نمودند. آن‌ها با تحلیل سیگنال‌های شتاب به کمک روش‌های تبدیل فوریه‌ی گسسته، تبدیل موجک و تبدیل وینر نشان دادند که تبدیل فوریه‌ی گسسته و موجک در شناسایی آسیب عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارند. در مطالعه‌ی بعدی [۱۱]، آن‌ها این تحقیق را گسترش دادند و با بررسی پاسخ سازه به سه رکورد زلزله و افزودن نویز تصادفی به داده‌های شتاب، نشان دادند که تبدیل موجک علاوه بر دقت بالاتر، پایداری بیشتری در برابر نویز تصادفی ارائه می‌دهد. ثوریا^۴ و همکاران [۱۲]، از تبدیل موجک برای ارزیابی سطح خوردگی در میلگردهای تعبیه شده در اجزای بتن مسلح استفاده کردند. لیو^۵ و همکاران [۱۳]، برای ردیابی پیشرفت آسیب در تیرها از تبدیل موجک پیوسته و شاخص‌های تغییر انرژی موجک استفاده کردند تا مکان و شدت آسیب زمان‌متغیر شناسایی شود. دمیرلی‌اوغلو^۶ و اردو ران^۷ [۱۴]، برای شناسایی آسیب در پل‌ها از تبدیل موجک پیوسته شتاب‌های ثبت‌شده توسط حسگرهای عبوری روی خودرو بهره بردند و نتایج نشان داد که این روش حتی بدون داده‌های معادل از پل سالم قادر به تشخیص آسیب است. هانتیه^۸ و همکاران [۱۵]، تبدیل موجک پیوسته را جهت شناسایی مکان و شدت آسیب در ساختمان چهارطبقه به کار بردند. توئله^۹ و کراوچوک^{۱۰} [۱۶]، آسیب در تیرهای بتنی را با استفاده از انحنا مدال در ترکیب با تبدیل موجک پیوسته شناسایی کردند.

علاوه بر کاربرد تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی حوزه زمان-فرکانس، اخیراً، شاخص‌های مبتنی بر آنتروپی به‌عنوان رویکردی نوین برای سنجش بی‌نظمی و پیچیدگی سیگنال‌های ارتعاشی سازه در پایش سلامت توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. در سال ۱۸۵۰ کلمه آنتروپی (از واژه یونانی به معنی تغییر) برای نخستین بار در ترمودینامیک توسط کلاسیوس^{۱۱} معرفی شد. سپس در سال

¹ Jean Morlet

² Newland

³ Pine Flat

⁴ Thoriya

⁵ Liu

⁶ Demirlioglu

⁷ Erduran

⁸ Hanteh

⁹ Tewelde

¹⁰ Krawczuk

¹¹ Clausius

۱۹۴۸، شانون آنتروپی را جهت اندازه‌گیری میزان اطلاعات تعمیم داد [۱۷]. پینکوس^۱ در سال ۱۹۹۱، آنتروپی تقریبی را با هدف اندازه‌گیری نظم سیگنال توسعه داد. آنتروپی نمونه در سال ۲۰۰۰، توسط ریچمن و مورمن^۲ با هدف اصلاح آنتروپی تقریبی معرفی گردید. در سال ۲۰۰۷، چن^۳ با استفاده از توابع فازی، نسخه‌ای اصلاح‌شده از آنتروپی نمونه را ارائه کرد که با عنوان آنتروپی فازی شناخته شد [۱۸، ۱۹]. روش‌های مبتنی بر آنتروپی، به عنوان تکنیک‌های حوزه زمانی پردازش سیگنال با رویکرد داده‌محور و بدون نیاز به مدل‌سازی، رفتار دینامیکی سازه را تحلیل و تغییرات ناشی از آسیب را نمایان می‌سازند. مقایسه سطح آنتروپی میان وضعیت سالم و آسیب‌دیده، امکان تشخیص وقوع آسیب را فراهم می‌کند. از دیگر مزایای شاخص‌های آنتروپی می‌توان به مقاومت نسبت به نویز، قابلیت شناسایی آسیب‌های جزئی و غیرخطی حتی در داده‌های واقعی و پیچیده، سادگی محاسبات و قابلیت به‌کارگیری برای انواع مختلف سیگنال‌ها اشاره کرد. این ویژگی‌ها، آنتروپی را به گزینه‌ای کارآمد برای ارزیابی سلامت سازه‌ها تبدیل کرده‌اند.

عسگری‌نژاد و همکاران [۲۰]، وجود و شدت آسیب را با محاسبه شاخص‌های مختلف آنتروپی از جمله آنتروپی تقریبی، نمونه، فازی و نسخه چندمقیاسی و چندمقیاسی مرکب آن‌ها روی داده‌های شتاب پل Z24 شناسایی نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های پیشرفته‌تر آنتروپی نسبت به مدل‌های ساده‌تر، پایداری بالاتر در برابر نویز و دقت بیشتر در شناسایی آسیب و شدت آن دارند. ویمارشانا^۴ و همکاران [۱۹]، از آنتروپی نمونه و تابع پاسخ ضربه برای شناسایی ترک‌های تنفسی در تیر استفاده کردند. آمزکیتا-سانچز^۵ [۲۱]، عملکرد انواع آنتروپی را در تشخیص آسیب‌های اولیه یک ساختمان ۳۸ طبقه مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان دادند که آنتروپی‌های شانون، رنی، تقریبی و نمونه، توانایی بالایی در تفکیک شرایط سالم و آسیب‌دیده داشته و آنتروپی شانون دقیق‌ترین نتایج را ارائه کرده است. در مطالعه‌ای [۱۹]، شناسایی آسیب سازه‌ای مبتنی بر خروجی براساس آنتروپی با استفاده از تابع معکوس انتقال‌پذیری بررسی شد و نتایج آن با پاسخ شتاب و تابع پاسخ ضربه مقایسه گردید. مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی بر روی سازه سه طبقه با سناریوهای آسیب خطی و غیرخطی نشان دادند که شاخص آسیب مبتنی بر معکوس انتقال‌پذیری حساس‌تر بوده و آنتروپی نمونه در تشخیص نوع و شدت آسیب دقیق‌تر عمل کرد. آن و اوو [۲۲]، با تحلیل تغییرات انحنای بردار مشخصه آنتروپی تقریبی سیگنال‌های شتاب، توانستند وجود و مکان دقیق آسیب در قاب برشی شش طبقه را شناسایی کنند. ماچورو-لوپز^۷ و همکاران [۲۳]، آسیب در سازه پل را با استفاده از ترکیب تبدیل موجک و آنتروپی شانون شناسایی کردند که منجر به افزایش دقت و کاهش بار محاسباتی گردید. ویمارشانا و همکاران [۳]، از ترکیب آنتروپی نمونه و تبدیل موجک به منظور شناسایی ترک تنفسی در تیر استفاده کردند. سی‌ورا^۸ و همکاران [۲۴]، ترکیب آنتروپی رنی با تبدیل‌های ویگنر-ویل، تبدیل موجک پیوسته و گسسته را برای شناسایی ترک تنفسی بر روی سازه سه طبقه آلومینیومی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. ژو^۹ و همکاران [۲۵]، ترکیب آنتروپی جایگشتی با تبدیل موجک بسته‌ای برای شناسایی موقعیت و شدت آسیب در تیر جعبه‌ای فولادی پل‌ها استفاده کردند و نتایج نشان داد که این روش قابلیت بالایی در تشخیص آسیب و مقاومت در برابر نویز دارد. تان^{۱۰} و همکاران [۲۶]، از ترکیب آنتروپی شانون با تبدیل موجک پیوسته برای تعیین محل و میزان آسیب‌های سازه‌ای پل‌ها استفاده کردند.

نظر به این که پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ها در برابر تحریک‌های لرزه‌ای معمولاً دارای ماهیت غیرایستا و متغیر در طول زمان هستند، استفاده از ابزارهایی که امکان تحلیل در هر دو بُعد زمان و فرکانس را فراهم کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس، در این پژوهش از تبدیل موجک پیوسته برای تجزیه‌ی پاسخ‌های شتاب سازه در حوزه‌ی زمان-فرکانس جهت شناسایی تغییرات محلی و گذرای سیگنال استفاده شده است. سپس، آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی بر روی ضرایب موجک در تمام مقیاس‌ها به منظور ارزیابی بی‌نظمی موجود

¹Pincus

² Richman and Moorman

³ Chen

⁴ Wimarshana

⁵ Amezquita-Sanchez

⁶ An and Ou

⁷ Machorro-Lopez

⁸ Civera

⁹ Zhou

¹⁰ Tan

در سیگنال ارتعاشی محاسبه می‌گردد. مقایسه معیارهای آنتروپی در سازه سالم و آسیب‌دیده، امکان تشخیص رخداد آسیب را فراهم می‌کند. اگرچه در مطالعه ویمارشانا و همکاران [۳]، ترکیب تبدیل موجک پیوسته با موجک مادر سیملت و آنتروپی نمونه محاسبه شده بر روی ضرایب موجک برای شناسایی ترک تنفسی در اعضای ساده‌ای مانند تیرهای یک‌سر گیردار تحت تحریک‌های سینوسی به کار گرفته شده است اما در جستجوی نویسندگان، بررسی این رویکرد تاکنون در سازه‌های قاب برشی تحت تحریک زلزله مشاهده نشده است. علاوه بر این، در پژوهش حاضر، از موجک مادر مورلت به دلیل عملکرد بهتر در آشکارسازی تغییرات موضعی سیگنال استفاده شده است. همچنین، نوآوری اصلی این پژوهش در برقراری ارتباط میان فرکانس معادل مقیاس موجک و فرکانس طبیعی سازه‌ی سالم (با فرض در اختیار داشتن فرکانس‌های طبیعی) به منظور شناسایی مودهای حساس به آسیب می‌باشد. افزون بر این، در پژوهش حاضر، دو رکورد زلزله و سه معیار آنتروپی برای ارزیابی پایداری و حساسیت روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، میانگین شاخص آسیب مبتنی بر معیارهای آنتروپی طبقات مختلف سازه در حالات مختلف آسیب محاسبه می‌شود تا حساس‌ترین معیار آنتروپی نسبت به رخداد آسیب مشخص گردد که چارچوب دقیق آن در بخش بعدی تشریح خواهد شد. ادامه این مقاله به این شرح سازماندهی شده است: در بخش دوم، مفاهیم مرتبط با تبدیل موجک معرفی می‌شود. بخش سوم به معرفی مفهوم آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی اختصاص می‌یابد. در بخش چهارم و پنجم، روند تحقیق و مدل‌سازی عددی تشریح می‌شود و در نهایت، بخش ششم و هفتم تحلیل نتایج و ارائه جمع‌بندی را دربردارد.

۲- تبدیل موجک

تبدیل موجک روشی در پردازش سیگنال است که می‌تواند نوسانات یا نامنظمی‌های موجود در سیگنال‌ها را تقویت و آشکارتر کند. موجک، تابعی نرم و دارای نوسان سریع است که مقدار آن به سرعت به صفر میل می‌کند. تبدیل موجک پیوسته، یک سیگنال زمانی $x(t)$ را به حوزه‌ای دوبعدی (صفحه زمان-مقیاس) نگاشت می‌کند و با $CWT(\alpha, \tau)$ نمایش داده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳، ۲۷، ۲۸]:

$$CWT(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad (1)$$

که در آن α و τ به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال تابع موجک مادر $\psi(t)$ می‌باشند. رابطه بین فرکانس و مقیاس در تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر قابل بیان است [۲۹]:

$$f_c = f_c / a \quad (2)$$

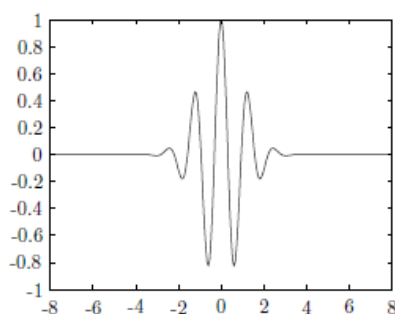
که f_c به عنوان مرکز باند یا فرکانس مرکزی طیف انرژی موجک تعریف می‌شود.

تبدیل موجک مانند یک پنجره عمل می‌کند و سیگنال در هر لحظه در این تابع پنجره ضرب می‌شود. در این تبدیل، عرض پنجره متناسب با تغییرات مؤلفه‌های فرکانسی تغییر می‌کند که این ویژگی مهم‌ترین خصوصیت تبدیل موجک به شمار می‌آید. این تبدیل در تحلیل ویژگی‌هایی مانند تمرکز انرژی در بخشی از سیگنال، ناپیوستگی‌ها، تغییرات ناگهانی و موارد مشابه کاربرد دارد [۱۱].

در تبدیل موجک، انتخاب موجک مادر مناسب برای تجزیه سیگنال از مسائل کلیدی محسوب می‌شود در پژوهش‌های علمی، انواع مختلفی از موجک‌های مادر از جمله موجک‌های مورلت، مورس، بامپ و کلاه مکزیکی معرفی شده‌اند. با توجه به تنوع بالای این موجک‌ها و روش‌های مختلف تحلیل زمان-فرکانس، انتخاب موجک بهینه برای یک کاربرد خاص به یک چالش تبدیل شده است [۳۰].

در میان توابع موجک بسیاری که شرط پذیرش را دارند، موجک مورلت با دارا بودن شکل گوسی در حوزه فرکانس از پرکاربردترین موجک‌ها به شمار می‌آید. نتایج کانولوشن موجک مورلت، وضوح زمانی سیگنال اصلی را حفظ می‌کند و نسبت به سایر موجک‌ها از نظر محاسباتی بهینه‌تر است [۳۱]. موجک مورلت یک موج سینوسی مختلط درون یک پوشش گوسی می‌باشد که بخش اعظم انرژی آن در یک بازه‌ی محدود متمرکز می‌شود و به دلیل واریانس یکسان در زمان و فرکانس، قابلیت بالایی در آشکارسازی ویژگی‌های محلی در هر دو حوزه‌ی

زمان و فرکانس دارد. همچنین، فاقد تابع مقیاس بوده و شرط پذیرش را به طور تقریبی برآورده می‌کند. تابع ریاضی موجک مورلت مطابق رابطه (۳) است:



شکل ۱: شکل موجک مورلت.

$$\psi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \left(e^{i2\pi f_c t} - e^{-\frac{(2\pi f_c)^2}{2} t^2} \right) e^{-t^2/2} \quad (3)$$

در صورتی که فرکانس زاویه‌ای موجک $\omega_0 = 2\pi f_c \geq 5$ باشد، عبارت $e^{-\frac{(2\pi f_c)^2}{2} t^2}$ قابل صرف نظر بوده و موجک مورلت ساده‌تر می‌شود:

$$\psi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} e^{i2\pi f_c t} e^{-t^2/2} \quad (4)$$

ضریب $\frac{1}{\pi^{1/4}}$ انرژی واحد موجک را تضمین می‌کند. این موجک با موفقیت در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی به کار گرفته شده است [۲۷، ۲۹، ۳۲]. فرم مختلط موجک مورلت نیز در مطالعات تعریف شده است [۲۷، ۳۳، ۳۴]. فرکانس مرکزی f_c ، فرکانس سیگنال سینوسی مختلط است و مقدار آن تعیین‌کننده تعداد مؤلفه‌های سینوسی مؤثر یا قابل توجه درون پوش موجک است. به صورت متداول، $f_c = 0.849 = \sqrt{\frac{1}{2 \ln 2}}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت $\omega_0 = 5.336$ خواهد بود. مقادیر ω_0 برابر با ۵ و ۶ (و همچنین مقادیر بین این دو) نیز در عمل استفاده می‌شود [۳۵].

۳- مفهوم آنتروپی

در حوزه‌ی پردازش سیگنال، آنتروپی به عنوان ابزاری کمی برای توصیف پیچیدگی یک سیستم شناخته می‌شود، به طوری که تغییر در وضعیت سیستم منجر به تغییر آنتروپی خواهد شد [۳۶، ۳۷].

۳-۱ آنتروپی تقریبی

آنتروپی تقریبی، بیانگر میزان تصادفی بودن، پیچیدگی و شباهت در یک سری زمانی است. مقدار آنتروپی تقریبی با درجه خودتشابهی در یک سری زمانی تعیین می‌شود که تقریباً برابر با میانگین منفی لگاریتم طبیعی احتمال شرطی است. به طوری که مجموعه داده‌ای به طول N ، خود را در رواداری r علاوه بر m نقطه، برای $m+1$ نقطه نیز تکرار می‌کند. برای سری زمانی $x(1), x(2), \dots, x(N)$ با N نمونه، ابتدا زیرمجموعه‌هایی به طول m طبق رابطه زیر تشکیل می‌شوند:

$$X(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)], i = 1, 2, \dots, N-m+1 \quad (5)$$

سپس فاصله چبیشف بین زیرمجموعه‌ها طبق رابطه (۶) و شباهت زیرمجموعه‌ها با هم و در کل سیگنال طبق روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌گردد:

$$d[X(i), X(j)] = \max(|x(i+k-1) - x(j+k-1)|) \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, m, i, j = 1, 2, \dots, N - m + 1$$

$$c_i^m(r) = \left(\frac{\text{number of } X(j) \text{ such that } d[X(i), X(j)] \leq r}{(N - m + 1)} \right) \quad (7)$$

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln c_i^m(r) \quad (8)$$

که r ، یک فیلتر است و به صورت $r = k \times SD$ تعریف می‌شود. K یک عدد ثابت مثبت و SD انحراف معیار استاندارد سری زمانی است. سپس به طریق مشابه برای زیرمجموعه‌های به طول $m+1$ ، ϕ^{m+1} محاسبه شده و در نهایت آنتروپی تقریبی طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{ApEn}(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r) \quad (9)$$

۳-۲ آنتروپی نمونه

آنتروپی نمونه معیاری برای اندازه‌گیری میزان نظم و پیچیدگی یک سری زمانی است. که به منظور رفع برخی کاستی‌های گزارش شده در آنتروپی تقریبی از قبیل اثر سوگیری و احتساب خود تطبیقی ایجاد شد. برای سری زمانی $x(1), x(2), \dots, x(N)$ با N نمونه، ابتدا زیرمجموعه‌هایی به طول m طبق رابطه (۱۰) تشکیل می‌شوند و سپس فاصله چبیشف بین زیرمجموعه‌ها طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد: [۳۸]

$$X(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)], i = 1, 2, \dots, N - m + 1 \quad (10)$$

$$d[X(i), X(j)] = \max(|x(i+k-1) - x(j+k-1)|) \quad (11)$$

$$k = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, N - m + 1, i \neq j$$

مطابق روابط (۱۲) و (۱۳)، شباهت زیرمجموعه‌ها باهم و در کل سیگنال محاسبه می‌شود. سپس به طریق مشابه، برای زیرمجموعه‌هایی به طول $m+1$ ، $B_i^{m+1}(r)$ محاسبه می‌گردد و در نهایت مقدار آنتروپی نمونه از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$B_i^m(r) = \frac{1}{N - m - 1} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} [\text{number of times that } d[|x(j) - x(i)|] \leq r] \quad (12)$$

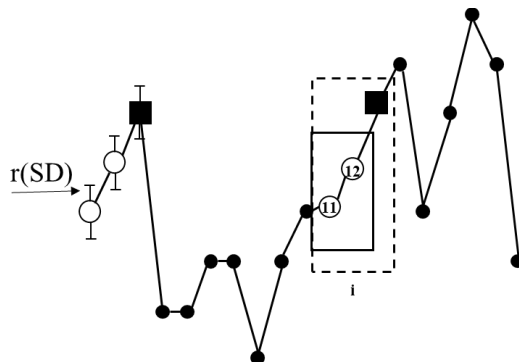
$$B^m(r) = \frac{1}{N - m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \quad (13)$$

در رابطه فوق r ، به صورت $r = k \times SD$ تعریف می‌شود که K یک عدد ثابت مثبت و SD انحراف معیار استاندارد سری زمانی می‌باشد.

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\ln \left[\frac{B^{m+1}(r)}{B^m(r)} \right] \quad (14)$$

شکل ۲، روند محاسبه آنتروپی تقریبی و نمونه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. طول زیربردارها $m=2$ در نظر گرفته شده است. تطابق بین الگوها بر اساس فاصله‌ی بین آن‌ها و رواداری r ارزیابی می‌شود که این رواداری برابر با مضربی از انحراف معیار سری زمانی است (و با میله‌های خطا در شکل نمایش داده شده است). در این مثال، الگوی مورد نظر با زیربردارهایی که از نقاط ۱۱ و ۱۲ تشکیل شده‌اند (کادر

توپر) تطابق دارد و همچنین مقادیر نقطه‌ی بعدی (یعنی نقطه‌ی سیزدهم، مشخص شده با کادر خط چین) نیز با هم تطابق دارند که در محاسبه‌ی آنتروپی تقریبی و نمونه لحاظ می‌شود [۳۹].



شکل ۲: نمایش شماتیک برآورد آنتروپی تقریبی و نمونه.

۳-۳ آنتروپی فازی

آنتروپی فازی نسخه‌ای اصلاح شده از آنتروپی نمونه است که در آن فضاوت صفر و یکی تابع هویساید با یک تابع نمایی فازی جایگزین می‌شود. این جایگزینی موجب حذف مرز سخت میان شباهت و عدم شباهت و در نظر گرفتن کاهش تدریجی شباهت بین بردارها می‌گردد [۴۰، ۴۱]. برای سری زمانی $x(1), x(2), \dots, x(N)$ با N نمونه، ابتدا زیرمجموعه‌هایی به طول m طبق رابطه زیر تشکیل می‌شوند:

$$X_i = [x(i), x(i+1), \dots, x(i-m+1)] - x_0(i) \quad (15)$$

که در آن، $x_0(i)$ از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_0(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x(i+j), \quad i=1, 2, \dots, N-m+1 \quad (16)$$

سپس فاصله چبیشف بین زیرمجموعه‌ها، از رابطه (۱۱) و شباهت زیرمجموعه باهم و در کل سیگنال از طریق روابط (۱۷) و (۱۸)

محاسبه می‌شود:

$$D_{ij}^m(n, r) = \mu(d_{ij}^m, n, r) = \exp\left(-\frac{(d_{ij}^m)^n}{r}\right) \quad (17)$$

$$\phi^m(n, r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \left(\frac{1}{N-m-1} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} D_{ij}^m \right) \quad (18)$$

که در آن، n و r به ترتیب شیب و عرض مرز تابع نمایی هستند.

سپس به طریق مشابه، زیرمجموعه‌های مشابه در کل سیگنال برای بعد $m+1$ ، محاسبه شده و در نهایت آنتروپی فازی از طریق رابطه

(۱۹) به دست می‌آید:

$$\text{FuzzyEn}(m, n, r, N) = \ln \phi^m(n, r) - \ln \phi^{m+1}(n, r) \quad (19)$$

در آنتروپی فازی، با کسر میانگین هر زیرمجموعه پیش از محاسبه فاصله چبیشف، منجر به حذف اثرات کلی و آشکار شدن تغییرات

جزئی‌تر و الگوهای محلی در آن‌ها می‌شود.

۴- روش تحقیق

در این پژوهش، روشی مبتنی بر تلفیق تبدیل موجک پیوسته و آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی به منظور شناسایی آسیب در قاب برشی به کار گرفته می‌شود. فرآیند تحلیل به گونه‌ای طراحی شده که ابتدا اطلاعات زمان-فرکانس دقیق از سیگنال‌های پاسخ شتاب سازه تحت دو تحریک زلزله قبل و بعد از رخداد آسیب با تبدیل موجک استخراج می‌گردد. سپس، آنتروپی‌های تقریبی، نمونه و فازی به عنوان معیار آماری برای سنجش میزان بی‌نظمی و پیچیدگی سیگنال و آشکارسازی تغییرات در پاسخ ارتعاشی سازه بر اثر رخداد آسیب، مورد استفاده قرار می‌گیرند. خروجی تبدیل موجک پیوسته یک ماتریس زمان-مقیاس است که مقایسه مستقیم آن بین حالت‌های سالم و آسیب‌دیده سازه دشوار می‌باشد. معیارهای آنتروپی با تبدیل اطلاعات ماتریس به یک مقدار عددی برای هر مقیاس، بی‌نظمی و پیچیدگی ساختاری ضرایب موجک را کمی کرده و امکان مقایسه‌ای دقیق و ساده‌تر میان حالت‌های سالم و آسیب‌دیده را فراهم می‌آورند.

از آنجا که کیفیت تحلیل زمان-فرکانس با تبدیل موجک وابسته به انتخاب موجک مادر است، انتخاب موجکی که بتواند تفکیک دقیق و حساسیت بالا به تغییرات محلی سیگنال‌ها داشته باشد، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، چندین موجک مادر از جمله موجک بامپ، مورس و مورلت در تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفتند تا مناسب‌ترین گزینه جهت استخراج ویژگی‌های مرتبط با آسیب تعیین شود. بر اساس نتایج مقایسه، موجک مورلت به دلیل عملکرد بهتر در شناسایی نوسانات گذرا و آشکارسازی تغییرات موضعی سیگنال در اثر آسیب، به عنوان گزینه‌ی نهایی انتخاب شد.

انتخاب پارامترهای مربوط به معیارهای آنتروپی، چالشی دیگر در مطالعات مرتبط با مفاهیم پیچیدگی سیگنال محسوب می‌شود. همچنین مطالعات نشان داده‌اند که مقادیر، $m=1,2$ و $r=(0.1 \sim 0.25)SD$ باعث تولید اعتبار آماری خوب برای آنتروپی تقریبی و نمونه می‌شوند [۴۳، ۴۲]. بنابراین، در این مطالعه مقدار $m=2$ و $r=0.2$ در محاسبه آنتروپی تقریبی و نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به این که در مطالعات پیشین [۴۴]، مقادیر $m=1,2, n=1-3, r=0.1-0.25$ برای محاسبه آنتروپی فازی به طور گسترده مورد استفاده و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند، در تحقیق حاضر نیز از مقادیر $m=2, n=2, r=0.2$ در محاسبه آنتروپی فازی بهره گرفته می‌شود.

روند مطالعه به شرح زیر است:

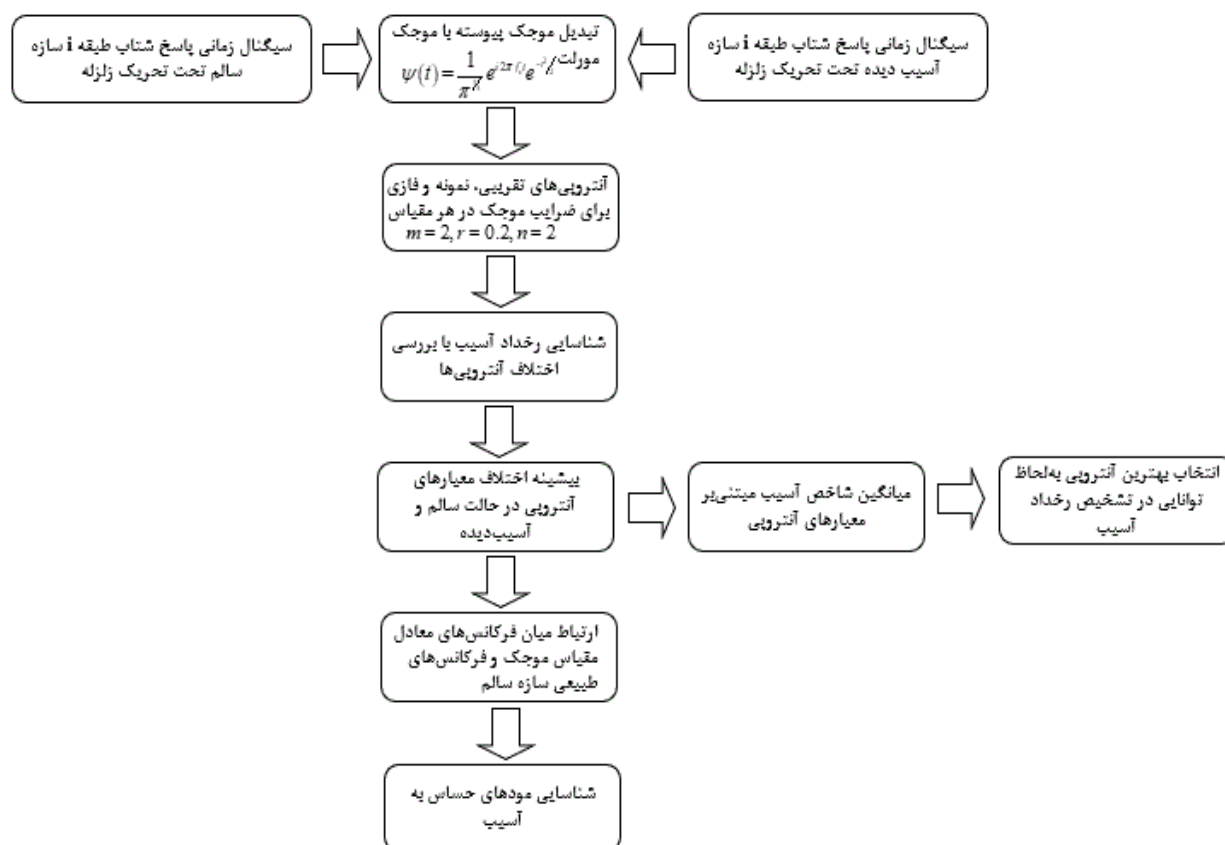
در گام نخست، پاسخ‌های شتاب ثبت شده از سازه سالم تحت تحریکات لرزه‌ای (با زلزله کوبه و السنترو) با استفاده از تبدیل موجک پیوسته پردازش می‌شوند. تبدیل موجک با استفاده از پنجره نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد. در این مطالعه، تعداد مقیاس‌ها مطابق با تنظیمات پیش‌فرض نرم‌افزار متلب برای موجک مادر مورلت ۹۲ مقیاس برای رکورد زلزله کوبه و ۱۰۱ مقیاس برای رکورد زلزله السنترو در نظر گرفته شده است. برای هر مقیاس، فرکانس معادل آن محاسبه می‌گردد تا بتوان تحلیل‌ها را با فرکانس‌های طبیعی سازه مرتبط کرد. سپس با تعریف آسیب از طریق کاهش سختی طبقات مختلف سازه، داده‌های زمان-مقیاس برای شتاب سازه آسیب دیده نیز استخراج می‌گردد. در ادامه، آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی برای ضرایب موجک هر مقیاس از سازه سالم و آسیب‌دیده محاسبه می‌شوند تا میزان بی‌نظمی و تغییرات سیگنال در باندهای فرکانسی متناظر با هر مقیاس ارزیابی شود. این تحلیل اجازه می‌دهد تا مشخص گردد در کدام محدوده فرکانسی، رفتار دینامیکی سازه دستخوش تغییر شده است. از آنجا که آسیب‌های سازه‌ای معمولاً تأثیر خود را در یک یا چند باند فرکانسی خاص ظاهر می‌کنند، مشاهده نوسانات آنتروپی در آن مقیاس‌ها می‌تواند به عنوان شاخص حساس برای شناسایی رخداد آسیب عمل کند. انتظار می‌رود نواحی فرکانسی دارای حداکثر اختلاف بین مقادیر آنتروپی حالت سالم و آسیب‌دیده سازه، محدوده‌ی فرکانس‌های طبیعی سازه را مشخص نمایند.

در این مطالعه، شاخص آسیب به صورت درصد تغییرات آنتروپی پاسخ دینامیکی هر یک از طبقات طبق رابطه (۲۰) در مقیاسی که بیشینه اختلاف معیارهای آنتروپی بین حالت سالم و آسیب‌دیده رخ می‌دهد، محاسبه می‌شود. سپس میانگین شاخص آسیب مبتنی بر معیارهای آنتروپی طبقات سازه برای حالات مختلف آسیب محاسبه می‌شود تا مشخص گردد کدام معیار آنتروپی عملکرد بهتری در شناسایی رخداد آسیب دارد.

روند پژوهش به طور شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$DI = \frac{|E_{damaged}(i) - E_{undamaged}(i)|}{E_{undamaged}} \times 100 \quad (20)$$

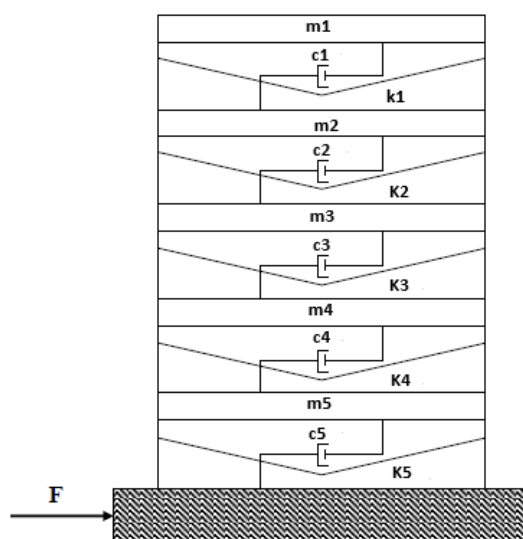
که در آن، $E_{damaged}$ و $E_{undamaged}$ به ترتیب انرژی پاشی دینامیکی سازه در حالت‌های آسیب‌دیده و سالم هستند. با این تعریف انتظار می‌رود تغییرات انرژی پاشی بیشتر، منجر به شاخص آسیب بزرگتر گردد.



شکل ۳: نمایش شماتیک روند شناسایی آسیب و مودهای حساس به آسیب با روش موجک-آنتروپی.

۵- مدل‌سازی عددی

رویکرد ارائه شده در این مقاله بر روی مدل عددی از یک سازه قاب برشی پنج طبقه [۴۵] اعمال شده و عملکرد آن تحت بارهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، قاب مذکور به صورت دوبعدی با مقادیر مشخص جرم، سختی و میرایی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. شکل ۴، مدل شماتیک قاب را نشان می‌دهد.



شکل ۴: شکل شماتیک قاب برشی پنج طبقه.

معادله دیفرانسیل حاکم بر دینامیک سیستم خطی طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (21)$$

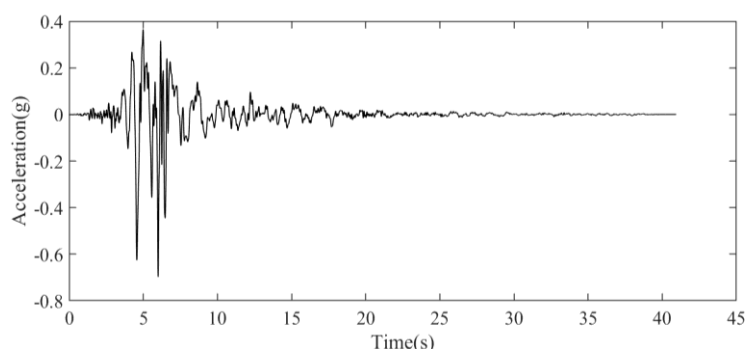
که در آن، $[M]$ ، $[K]$ و $[C]$ به ترتیب ماتریس های جرم، سختی و میرایی سیستم و بردار F ، نیروی زلزله وارد بر طبقات می باشند. جرم و سختی برای تمامی طبقات ۳۰ تن و ۹۲۶۰ کیلو نیوتن بر متر بوده و ماتریس میرایی به صورت میرایی رایلی تعریف می شود. ضرایب رایلی بر اساس فرکانس های طبیعی و نسبت های میرایی دو مود اول سیستم محاسبه می شود. فرکانس های طبیعی، نسبت های میرایی و زمان های تناوب تحلیلی ارتعاش سازه سالم (حالت مرجع) در جدول ۱ ارائه شده است.

$$C = \alpha_0 \times m + \alpha_1 \times K, \quad \alpha_0 = 0.1102, \quad \alpha_1 = 0.0036 \quad (22)$$

در این تحقیق، مدل عددی سازه با زمین لرزه کوبه (شکل ۵) و رکورد زلزله السنترو تحریک می شود. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده و پاسخ های لرزه ای میرا شده سیستم با استفاده از روش نیومارک-بتا محاسبه می شوند. فرکانس نمونه برداری، بر اساس گام زمانی ثبت داده ها، برای زلزله کوبه برابر با ۱۰۰ هرتز و برای زلزله السنترو برابر با ۲۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: نسبت های میرایی، فرکانس های طبیعی و زمان تناوب مودهای ارتعاشی سازه

مود	نسبت میرایی (%)	فرکانس طبیعی (Hz)	زمان تناوب ارتعاش (s)
۱	۲	$f_1 = 0.7959$	۱/۲۵۶۵
۲	۳	$f_2 = 2.3231$	۰/۴۳۰۵
۳	۴/۴	$f_3 = 3.6622$	۰/۲۷۳۱
۴	۵/۵	$f_4 = 4.7046$	۰/۲۱۲۶
۵	۶/۲	$f_5 = 5.3658$	۰/۱۸۶۴



شکل ۵: تاریخچه زمانی شتاب زمین لرزه کوبه.

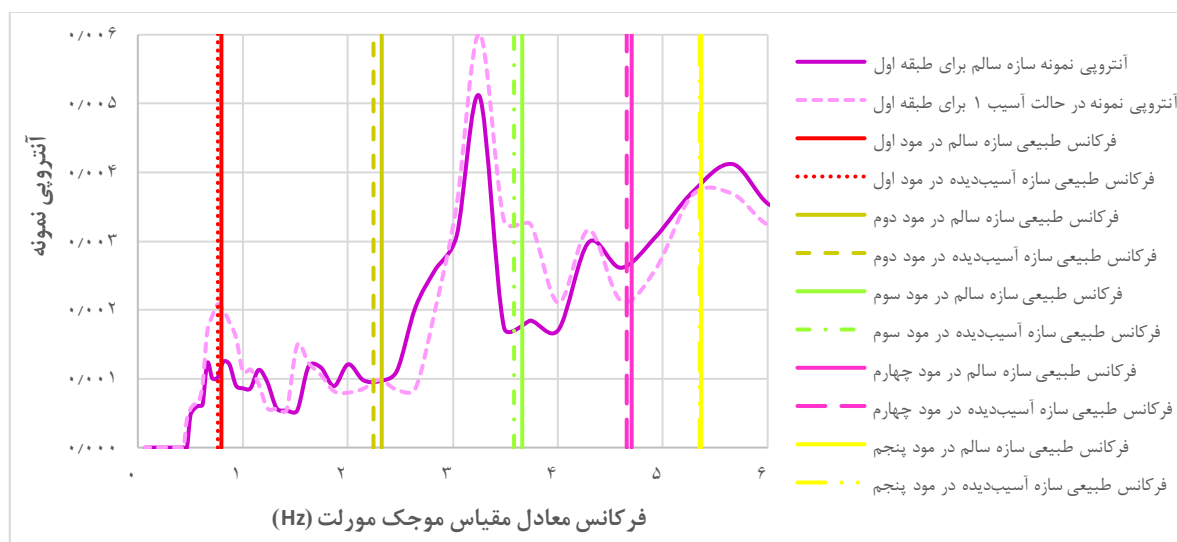
در این تحقیق، با فرض استقرار سنسورهای شتاب در تمام درجات آزادی سازه، پاسخ‌های سازه ثبت می‌شوند. مدل شبیه‌سازی شده در معرض حالت‌های مختلفی از آسیب خطی قرار می‌گیرد که بر اثر کاهش میزان مشخصی از سختی طبقات به سازه اعمال می‌شود. حالت‌های آسیب تعریف‌شده در جدول ۲ ارائه داده شده‌اند. این روش، با وجود آنکه منشأ فیزیکی آسیب در واقعیت ممکن است منجر به رفتار غیرخطی شود، اما پاسخ دینامیکی سیستم به صورت خطی فرض شده یعنی سازه پس از آسیب همچنان رفتار خطی ارتجاعی دارد اما با سختی کمتر. این رویکرد، در مطالعات عددی رایج است و امکان بررسی ساده‌تر تأثیر آسیب بر پاسخ سیستم را فراهم می‌کند.

جدول ۲: حالات آسیب در نظر گرفته شده به صورت کاهش سختی طبقات در مدل عددی

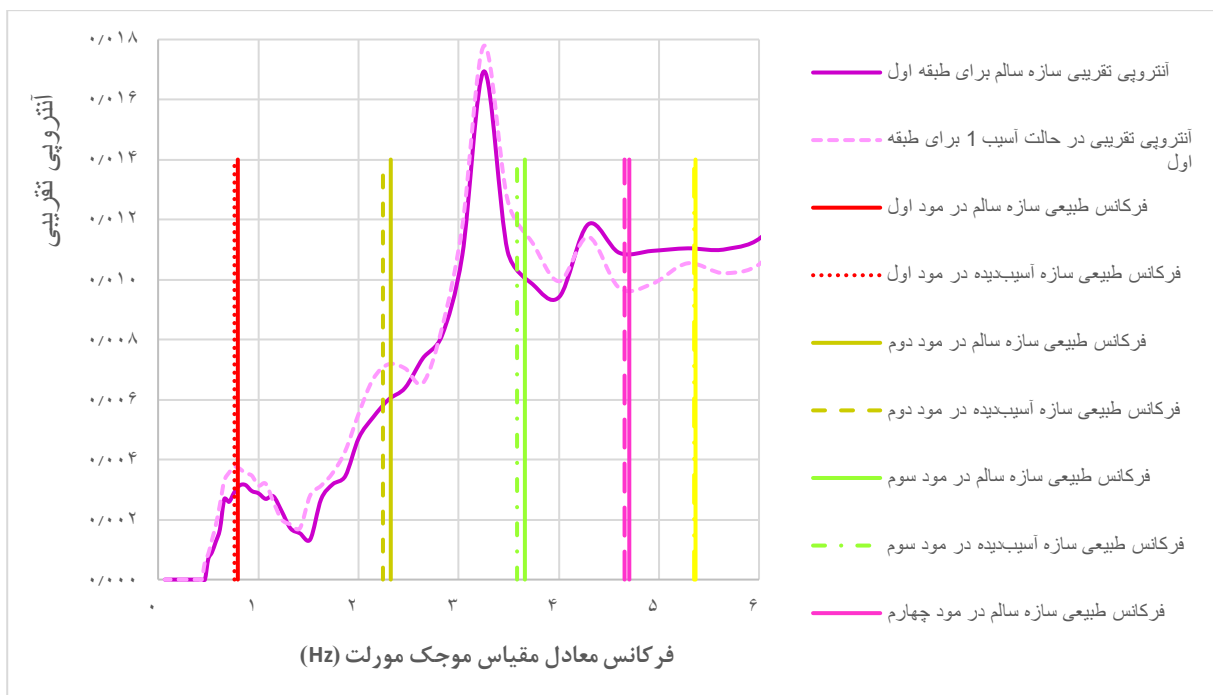
حالات آسیب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
میزان آسیب	۲۰٪	۲۰٪	۲۰٪	۲۰٪	۲۰٪	۵۰٪	۵۰٪	۵۰٪	۵۰٪	۵۰٪
محل آسیب	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم	طبقه پنجم	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم	طبقه پنجم

۶- نتایج

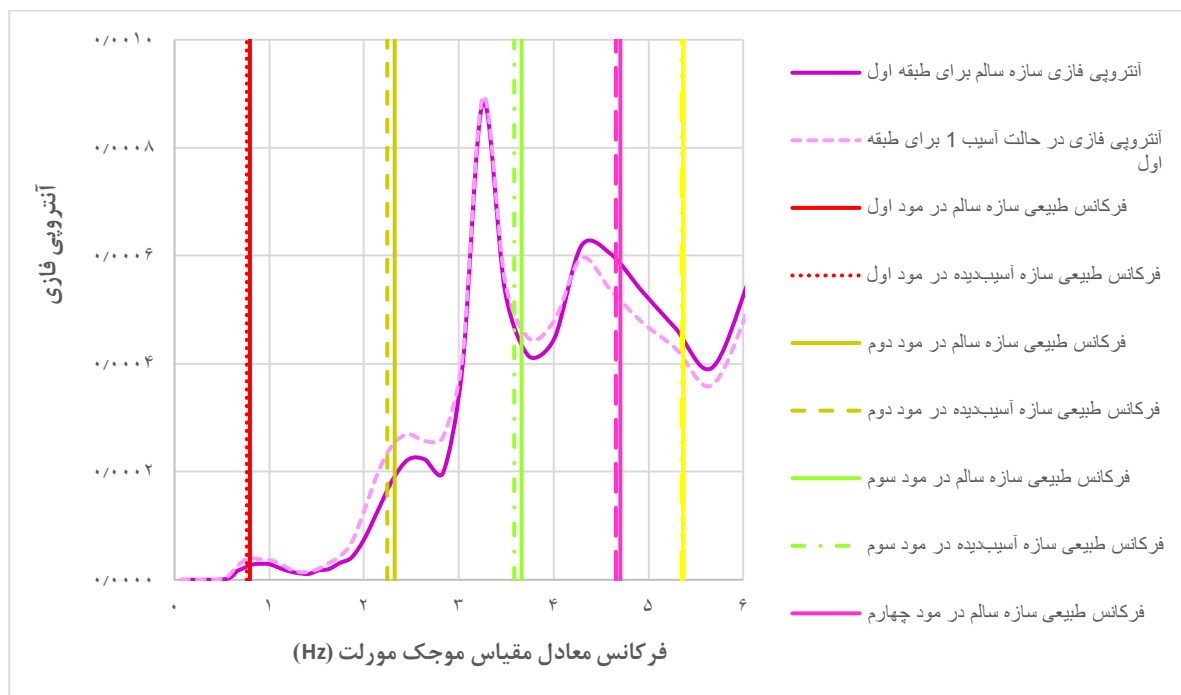
در این بخش، به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی بر پایه ضرایب موجک پیوسته پاسخ شتاب طبقات سازه، در حالت‌های مختلف آسیب محاسبه شده است. به دلیل تعدد نتایج، برای دو رکورد زلزله و طبقات مختلف سازه در حالات مختلف آسیب، جهت نمایش روند کلی تغییرات آنتروپی، از هر معیار آنتروپی تنها یک نمونه نماینده از تحلیل‌های انجام‌شده در اشکال (۶ تا ۸) ارائه گردیده است. سپس در جداول ۳ تا ۸، شاخص آسیب مبتنی بر معیارهای آنتروپی همراه با فرکانس‌های معادل مقیاس و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آن‌ها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله کوبه و السنترو خلاصه شده‌اند.



شکل ۶: آنتروپی نمونه ضرایب موجک پیوسته برای پاسخ شتاب طبقه اول سازه تحت تحریک زلزله کوبه در حالت آسیب ۱.



شکل ۷: آنتروپی تقریبی ضرایب موجک پیوسته برای پاسخ شتاب طبقه اول سازه تحت تحریک زلزله کوبه در حالت آسیب ۱.



شکل ۸: آنتروپی فازی ضرایب موجک پیوسته برای پاسخ شتاب طبقه اول سازه تحت تحریک زلزله کوبه در حالت آسیب ۱.

جدول ۳: شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی نمونه همراه با فرکانس‌های معادل مقیاس موجک مورلت (Hz) و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آنها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله کوبه

شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی نمونه

فرکانس‌های معادل مقیاس موجک مورلت (Hz)

فرکانس طبیعی سازه سالم در مدل تحلیلی (Hz)

حالات آسیب	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
۱	۸۹/۱۵	۱۵۹/۸۳	۱۳۳/۹۵	۱۱۱/۴۵	۳/۴۸۸۸	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۳/۴۸۸۸	۱۱۱/۴۵	۱۱۷/۷۴	۱۳۳/۹۵	۱۵۹/۸۳
۲	۸۴/۵۹	۱۵۹/۴۷	۱۳۹/۲۴	۱۲۳/۳۱	۴/۰۰۷۶	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۴/۰۰۷۶	۱۱۹/۳۵	۱۲۳/۳۱	۱۳۹/۲۴	۱۵۹/۴۷
۳	۱۵۶/۱۶	۷۷/۰۳	۹۸/۹۰	۸۶/۶۸	۳/۴۸۸۸	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۳/۴۸۸۸	۸۶/۶۸	۹۰/۶۸	۹۸/۹۰	۷۷/۰۳
۴	۶۰/۴۲	۵۸/۶۵	۶۰/۷۳	۳۵/۶۱	۲/۶۴۴۰	۱/۸۶۹۶	۱/۸۶۹۶	۱/۸۶۹۶	۱/۸۶۹۶	۱/۸۶۹۶	۲/۶۴۴۰	۲۹/۷۴	۳۵/۶۱	۶۰/۷۳	۵۸/۶۵
۵	۱۲۱/۲۷	۳۶/۲۸	۹۶/۳۰	۴۳/۱۱	۳/۴۸۸۸	۲/۶۴۴۰	۳/۷۳۹۲	۲/۶۴۴۰	۳/۴۸۸۸	۹۴/۱۵	۳/۴۸۸۸	۹۴/۱۵	۴۳/۱۱	۹۶/۳۰	۳۶/۲۸
۶	۱۸۶/۷۸	۲۸۷/۵۳	۲۲۴/۲۴	۱۹۱/۷۸	۱/۶۶۱۰	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۳/۴۸۸۸	۱/۶۶۱۰	۱۷۸/۶۴	۱۹۱/۷۸	۲۲۴/۲۴	۲۸۷/۵۳
۷	۱۸۳/۴۷	۲۵۷/۳۹	۱۸۷/۳۳	۱۵۵/۵۶	۴/۰۰۷۶	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۰/۷۰۸۴	۴/۰۰۷۶	۱۵۱/۲۵	۱۵۵/۵۶	۱۸۷/۳۳	۲۵۷/۳۹	۱۸۳/۴۷
۸	۱۹۰/۱۶	۷۷/۹۴	۱۵۳/۵۶	۱۷۴/۰۴	۳/۴۸۸۸	۱/۰۷۳۸	۱/۰۷۳۸	۰/۷۰۸۴	۳/۷۳۹۲	۱۶۴/۱۵	۳/۴۸۸۸	۱۶۴/۱۵	۱۷۴/۰۴	۱۵۳/۵۶	۷۷/۹۴
۹	۷۸/۴۹	۱۲۶/۵۸	۷۴/۵۱	۱۲۱/۶۷	۳/۰۳۷۲	۱/۸۶۹۶	۰/۷۰۸۴	۱/۸۶۹۶	۳/۰۳۷۲	۱۱۴/۲۵	۳/۰۳۷۲	۱۱۴/۲۵	۱۲۱/۶۷	۷۴/۵۱	
۱۰	۱۲۸/۴۹	۳۴/۰۴	۵۹/۰۲	۱۱۳/۹۹	۳/۴۸۸۸	۲/۶۴۴۰	۱/۸۶۹۶	۳/۲۵۵۲	۳/۴۸۸۸	۹۷/۷۰	۳/۴۸۸۸	۹۷/۷۰	۱۱۳/۹۹	۵۹/۰۲	۳۴/۰۴

جدول ۴: شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی تقریبی همراه با فرکانس‌های معادل مقیاس و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آن‌ها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله کوبه

حالات آسیب	شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی تقریبی															فرکانس‌های معادل مقیاس موجک مورلت (Hz)	فرکانس طبیعی سازه سالم در مدل تحلیلی (Hz)
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵		
۱	۱۵/۵۴	۳۲/۱۲	۱۷/۴۴	۳۲/۵۸	۲۵/۸۹	۳/۴۸۸۸	۱/۷۴۴۴	۳/۲۵۵۲	۴/۰۰۷۶	۱/۲۳۳۵	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۲۱	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲		
۲	۵۴/۸۲	۲۷/۸۰	۲۴/۸۰	۲۳/۲۸	۳۲/۸۳	۴/۰۰۷۶	۰/۷۰۸۴	۴/۶۰۳۵	۱/۲۳۳۵	۳/۰۳۷۲	۳/۶۶۲۲	۰/۷۰۸۴	۴/۷۰۴۶	۳/۶۶۲۲			
۳	۱۸/۵۷	۱۶/۱۷	۲۵/۰۹	۳۲/۶۳	۳۹/۹۰	۳/۴۸۸۸	۳/۷۳۹۲	۳/۴۸۸۸	۴/۰۰۷۶	۳/۰۳۷۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲			
۴	۱۹	۴۴/۲۳	۲۵/۹۹	۲۰/۱۹	۱۷/۰۹	۳/۰۳۷۲	۲/۱۴۷۶	۲/۶۴۴۰	۱/۸۶۹۶	۱/۴۴۴۴	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۲۱	۲/۳۲۲۱	۲/۳۲۲۱			
۵	۴۰/۰۵	۳۰/۴۴	۳۹/۶۶	۲۷	۴۲/۹۸	۴/۰۰۷۶	۱/۷۴۴۴	۳/۷۳۹۲	۴/۰۰۷۶	۳/۰۳۷۲	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۲۱	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲			
۶	۳۲/۱۵	۲۰/۷۹	۳۶/۲۳	۷۲/۶۸	۳۰/۱۲	۳/۴۸۸۸	۳/۲۵۵۲	۰/۶۱۶۷	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۰/۷۰۸۴			
۷	۱۱۳/۹۱	۳۱/۵۱	۴۶/۶۶	۸۵/۸۵	۴۸/۲۵	۴/۰۰۷۶	۴/۰۰۷۶	۰/۵۷۵۴	۳/۴۸۸۸	۳/۰۳۷۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۰/۷۰۸۴			
۸	۳۶/۷۴	۱۱۲/۶۰	۴۴	۴۰/۵۹	۱۹/۶۸	۳/۲۵۵۲	۲/۱۴۷۶	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۲۱	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲			
۹	۵۹/۰۷	۱۴۱/۹۴	۹۰/۰۲	۳۴/۹۳	۵۴/۸۶	۳/۰۳۷۲	۲/۰۰۳۸	۲/۸۳۳۸	۱/۶۲۷۶	۱/۶۲۷۶	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۲۱	۲/۳۲۲۱	۲/۳۲۲۱			
۱۰	۲۲/۳۵	۶۹/۳۷	۶۴/۴۶	۶۱/۹۹	۷۳/۵۹	۳/۲۵۵۲	۲/۰۰۳۸	۲/۶۴۴۰	۲/۶۴۴۰	۱/۶۲۷۶	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۲۱	۲/۳۲۲۱	۲/۳۲۲۱			

جدول ۵: شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی فازی همراه با فرکانس‌های معادل مقیاس و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آن‌ها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله کوبه

حالات آسیب	شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی فازی															فرکانس‌های معادل مقیاس موجک مورلت (Hz)	فرکانس طبیعی سازه سالم در مدل تحلیلی (Hz)
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵		
۱	۵۴/۲۳	۰	۳۲/۸۸	۱۷/۳۱	۲۵/۰۳	۲/۱۴۷۶	۳/۶۸۸۸	۳/۶۸۸۸	۱/۴۱۶۹	۳/۴۸۸۸	۳/۶۶۲۲	-	۲/۳۲۲۱	۳/۴۸۸۸			

۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۳/۶۶۲۲	۴/۷۰۴۶	۳/۶۶۲۲	۳/۲۵۵۲	۱/۴۱۶۹	۳/۴۸۸۸	۴/۶۰۳۵	۴/۰۰۷۶	۱۴/۰۶	۱۶/۶۲	۲۳/۱۴	۱۹/۹۴	۱۰۰/۸۲	۲
۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۰۳۷۲	۳/۰۳۷۲	۳/۴۸۸۸	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۴۲/۳۷	۲۳/۸۶	۴۵/۱۶	۲۱/۲۸	۲۲/۱۰	۳
۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۳/۶۶۲۲	۱/۶۲۷۶	۱/۶۲۷۶	۲/۶۴۴۰	۲/۱۴۷۶	۳/۲۵۵۲	۱۸/۳۲	۱۵/۶۲	۶۷/۷۹	۸۸/۵۵	۱۷/۵۲	۴
۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	-	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۰۳۷۲	۲/۶۴۴۰	۳/۶۸۲۸	۳/۲۵۵۲	۴/۰۰۷۶	۵۸/۵۵	۴۵/۲۷	۰	۱۷/۸۸	۵۱/۴۲	۵
۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۲۵۵۲	۱/۴۱۶۹	۳/۲۵۵۲	۳/۴۸۸۸	۳/۲۵۵۲	۵۷/۵۱	۳۶/۵۴	۵۱/۴۸	۳۶/۲۹	۲۴/۳۹	۶
۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۴۸۸۸	۱/۴۱۶۹	۳/۴۸۸۸	۴/۰۰۷۶	۴/۰۰۷۶	۳۴/۶۸	۳۹/۲۷	۶۱/۳۸	۵۰/۴۱	۲۲۴/۱۲	۷
۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۲۵۵۲	۱/۴۱۶۹	۳/۲۵۵۲	۳/۴۸۸۸	۳/۲۵۵۲	۲۶/۲۰	۲۹/۶۶	۶۱/۰۲	۶۹/۹۶	۶۴/۴۴	۸
۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۳/۶۶۲۲	۱/۶۲۷۶	۱/۶۲۷۶	۲/۶۴۴۰	۲/۱۴۷۶	۳/۰۳۷۲	۶۵/۶۶	۵۱/۸۲	۲۴۰/۸۱	۲۶۸/۰۵	۸۸/۵۳	۹
۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۱/۶۲۷۶	۲/۴۶۷۰	۲/۶۴۴۰	۳/۴۸۸۸	۳/۲۵۵۲	۱۰۶/۹۸	۱۲۵/۱۰	۱۵۹/۳۵	۳۰/۷۷	۵۵/۴۰	۱۰

جدول ۶: شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی نمونه همراه با فرکانس‌های معادل مقیاس و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آن‌ها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله السترو

حالات آسیب	شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی نمونه														
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
۱	۳۰/۹۲	۶۵/۶۳	۶۴/۶۵	۶۶/۸۹	۶۳/۰۴	۲/۶۴۴۰	۰/۸۱۳۸	۱/۰۷۳۸	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۲/۳۲۳۱	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹
۲	۲۶/۳۴	۵۸/۰۸	۶۱/۰۵	۶۲/۹۷	۵۹/۴۷	۴/۰۰۷۶	۰/۸۱۳۸	۱/۰۷۳۸	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹
۳	۴۴/۰۳	۲۱/۵۱	۵۵/۶۸	۴۸/۷۷	۴۴/۶۶	۴/۶۰۳۵	۳/۲۵۵۲	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۴/۷۰۴۶	۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹
۴	۵۳/۱۸	۳۷/۷۱	۳۷/۵۰	۲۲/۱۱	۴۸/۶۵	۲/۶۴۴۰	۲/۴۶۷۰	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۲/۱۴۷۶	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۲/۳۲۳۱
۵	۶۱/۵۸	۲۲/۲۸	۴۱/۷۸	۳۲/۰۷	۳۱/۴۸	۳/۷۳۹۲	۲/۴۶۷۰	۲/۲۹۵۲	۳/۲۵۵۲	۲/۸۳۳۸	۴/۷۰۴۶	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱
۶	۳۲/۹۰	۴۳/۱۹	۴۷/۶۷	۴۹/۹۹	۵۳/۷۶	۳/۰۳۷۲	۳/۰۳۷۲	۳/۲۵۵۲	۴/۲۹۵۲	۲/۰۰۳۸	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۴/۷۰۴۶
۷	۴۴/۱۹	۲۱/۶۱	۲۷/۷۱	۴۲/۹۸	۴۱/۱۷	۴/۹۳۳۹	۶/۰۷۴۴	۵/۲۸۸۰	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۴/۷۰۴۶	۵/۳۶۵۸	۵/۳۶۵۸	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹
۸	۹۰/۰۷	۷۳/۳۵	۲۵/۶۹	۵۳/۵۰	۴۸/۷۱	۳/۷۳۹۲	۱/۰۷۳۸	۵/۲۸۸۰	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۳/۶۶۲۲	۰/۷۹۵۹	۵/۳۶۵۸	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹
۹	۶۹/۷۱	۳۶۶/۴۶	۷۶/۶۰	۶۵/۳۸	۶۳/۶۳	۲/۸۳۳۸	۱/۵۱۸۶	۲/۶۴۴۰	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۲/۳۲۳۱	۰/۷۹۵۹	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۰/۷۹۵۹
۱۰	۵۷/۲۹	۳۸/۹۵	۲۱/۸۹	۶۸/۶۵	۴۹/۲۸	۳/۰۳۷۲	۳/۲۵۵۲	۵/۲۸۸۰	۲/۷/۹۱	۲/۰۰۳۸	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۵/۳۶۵۸	-	۲/۳۲۳۱

جدول ۷: شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی تقریبی با فرکانس‌های معادل مقیاس و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آن‌ها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله السترو

حالات آسیب	شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی تقریبی														
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
۱	۲۱/۳۵	۱۴/۹۵	۴۰/۷۳	۴۲/۵۵	۴۱/۴۱	۲/۸۳۳۸	۴/۲۹۵۲	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۰/۷۵۹۳	۲/۳۲۳۱	۴/۷۰۴۶	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹
۲	۳۱/۴۳	۸/۶۲	۳۹/۶۱	۴۰/۷۷	۳۸/۹۴	۴/۰۰۷۶	۶/۵۱۰۳	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۳/۶۶۲۲	-	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹

۰/۷۹۵۹	۰/۷۹۵۹	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	۱/۱۵۰۹	۱/۱۵۰۹	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۲/۸۳۳۸	۲/۸۶۴	۳۰/۹۱	۱۷/۵۹	۱۴	۱۹/۳۹	۳
۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	۲/۳۲۳۱	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	۳/۰۳۷۲	۲/۶۴۴۰	۲/۶۴۷۰	۳/۲۵۵۲	۲/۸۳۳۸	۱۹/۳۵	۱۵/۶۲	۲۸/۴۹	۸/۱۵	۲۷/۸۳	۴
۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	۴/۷۰۴۶	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۰۳۷۲	۲/۶۴۷۰	۴/۲۹۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۷۳۹۲	۱۸/۸۴	۴۵/۸۲	۳۶/۳۳	۹/۹۸	۲۲/۴۱	۵
۲/۳۲۳۱	۴/۷۰۴۶	۳۲/۶۶۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۲/۰۰۳۸	۴/۲۹۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۴۸۸۸	۴/۲۹۵۲	۴۲/۹۵	۴۷/۴۷	۴۳/۱۶	۳۱/۹۷	۲۸/۹۸	۶
۰/۷۹۵۹	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۵/۳۶۵۸	۳/۶۶۲۲	۱/۱۵۰۹	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۶/۰۷۴۴	۳/۷۳۹۲	۳۵/۹۶	۳۲/۵۱	۳۳/۱۹	۱۵/۲۸	۷۳/۱۴	۷
۲/۳۲۳۱	۴/۷۰۴۶	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۲/۸۳۳۸	۴/۲۹۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۰۳۷۲	۴/۰۰۷۶	۴۵/۷۷	۳۳/۴۶	۳۰/۳۳	۳۳/۰۸	۲۴/۱۷	۸
۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۲/۳۲۳۱	-	۲/۳۲۳۱	۳/۲۵۵۲	۳/۰۳۷۲	۲/۶۴۴۰	۱/۸۶۹۶	۲/۸۳۳۸	۳۵/۷۵	۳۴/۴۹	۷۰/۵۸	۱۶۴/۱۰	۴۶/۴۱	۹
۲/۳۲۳۱	۳/۶۶۲۲	-	۳/۶۶۲۲	۳/۶۶۲۲	۲/۸۳۳۸	۳/۷۳۹۲	۷۳/۶۵۶	۳/۲۵۵۲	۳/۰۳۷۲	۶۶/۸۶	۶۱/۸۸	۰	۲۶/۳۲	۴۰/۲۷	۱۰

جدول ۸: شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی فازی همراه با فرکانس‌های معادل مقیاس و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به آن‌ها در طبقات مختلف سازه در حالات آسیب ۱ تا ۱۰ تحت تحریک زلزله السترو

حالات آسیب	شاخص آسیب مبتنی بر آنتروپی فازی														
	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ۴	طبقه ۵
۱	۱۵/۷۸	۲۲/۳۰	۲۲/۳۰	۲۷/۰۳	۴۱/۳۱	۶/۰۷۴۴	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲
۲	۶۴/۶۲	۹/۰۱	۲۶/۵۳	۴۷/۷۲	۱۲/۷۶	۴/۰۰۷۶	۶/۰۷۴۴	۴/۰۰۷۶	۴/۰۰۷۶	۱۲/۷۶	۴۷/۷۲	۲۶/۵۳	۹/۰۱	۶۴/۶۲	
۳	۴۰/۷۶	۲۱/۴۶	۲۲/۸۴	۳۴/۰۳	۲۱/۹۱	۲/۸۳۳۸	۳/۰۳۷۲	۳/۰۳۷۲	۲/۸۳۳۸	۲۱/۹۱	۳۴/۰۳	۲۲/۸۴	۲۱/۴۶	۴۰/۷۶	
۴	۳۰/۵۳	۱۱/۵۶	۱۰/۸۷	۱۱/۸۸	۱۳/۷۴	۳/۰۳۷۲	۳/۴۸۸۸	۳/۰۳۷۲	۳/۰۳۷۲	۱۳/۷۴	۱۱/۸۸	۱۰/۸۷	۱۱/۵۶	۳۰/۵۳	
۵	۲۸/۶۷	۱۲/۸۷	۰	۶۵/۶۸	۴۲/۴۷	۳/۴۸۸۸	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۴۲/۴۷	۶۵/۶۸	۰	۱۲/۸۷	۲۸/۶۷	
۶	۳۵/۳۱	۴۶/۶۲	۵۵/۰۸	۶۶/۸۷	۶۵/۶۳	۶/۰۷۴۴	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۶۵/۶۳	۶۶/۸۷	۵۵/۰۸	۴۶/۶۲	۳۵/۳۱	
۷	۱۶۲/۷	۹/۸۸	۴۶/۲۲	۳۹/۶۸	۱۳۲/۴	۳/۷۳۹۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۷۳۹۲	۱۳۲/۴	۳۹/۶۸	۴۶/۲۲	۹/۸۸	۱۶۲/۷	
۸	۴۵/۸۹	۶۳/۹۲	۴۴/۶۵	۶۱/۴۷	۲۲۵	۴/۹۳۳۹	۳/۰۳۷۲	۳/۰۳۷۲	۴/۹۳۳۹	۲۲۵	۶۱/۴۷	۴۴/۶۵	۶۳/۹۲	۴۵/۸۹	
۹	۴۵/۹۶	۳۸/۵۲	۸۹/۸۸	۴۳/۶۶	۶۵/۸۷	۳/۲۵۵۲	۳/۴۸۸۸	۳/۰۳۷۲	۳/۲۵۵۲	۶۵/۸۷	۴۳/۶۶	۸۹/۸۸	۳۸/۵۲	۴۵/۹۶	
۱۰	۶۱/۴۶	۳۹/۱۰	۱۳۴/۳	۱۳۹/۱	۲۷۱	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۳/۲۵۵۲	۲۷۱	۱۳۹/۱	۱۳۴/۳	۳۹/۱۰	۶۱/۴۶	

مطابق اشکال ۶ تا ۸، آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی حاصل از تبدیل موجک پیوسته پاسخ شتاب طبقات مختلف سازه در حالت‌های گوناگون آسیب، تغییرات محسوس در رفتار دینامیکی سازه بر اثر وقوع آسیب را نشان می‌دهند. این تغییرات در ضرایب تبدیل موجک بازتاب یافته و در نهایت به اختلاف در مقادیر معیارهای آنتروپی میان حالت‌های سالم و آسیب‌دیده منجر می‌شوند. این روند در تمام حالت‌های آسیب بررسی شده مشاهده می‌گردد و گویای آن است که آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی بر مبنای ضرایب تبدیل موجک پیوسته می‌تواند به‌عنوان شاخصی کارآمد برای آشکارسازی آسیب مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین مطابق جداول ۳ تا ۸، بررسی ده حالت آسیب در تمام طبقات سازه نشان می‌دهد که بیشینه اختلاف آنتروپی تقریبی، نمونه و فازی بین حالت سالم و آسیب‌دیده عمدتاً در فرکانس‌های نزدیک فرکانس‌های طبیعی سازه رخ می‌دهد؛ به طوری که برای هر دو رکورد زلزله کوبه و السنترو، غالباً بیشینه اختلاف آنتروپی نمونه در فرکانس‌های متناظر با مود اول و آنتروپی تقریبی و فازی در فرکانس‌های متناظر با مود سوم مشاهده می‌شود. بنابراین، معیارهای آنتروپی بر مبنای ضرایب تبدیل موجک پیوسته، نه تنها قادرند وقوع آسیب را تشخیص

دهند، بلکه امکان شناسایی مودهای حساس به آسیب را نیز فراهم می‌سازند.

علاوه بر این، مطابق جدول ۹، میانگین شاخص آسیب مبتنی بر آنالیز نمونه طبقات سازه در اکثر حالات بیشتر از میانگین شاخص‌های مبتنی بر آنالیز تقریبی و فازی است. به طور مشخص، برای رکورد زلزله کوبه، میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز نمونه در تمامی حالات آسیب نسبت به آنالیز تقریبی و در هشت حالت نسبت به آنالیز فازی بیشتر است و برای رکورد زلزله السنترو، در نه حالت آسیب نسبت به آنالیز تقریبی و در شش حالت نسبت به آنالیز فازی مقادیر بالاتری نشان می‌دهد. این امر حاکی از توانایی بیشتر آنالیز نمونه در تشخیص وقوع آسیب می‌باشد زیرا تغییرات آن در مواجهه با آسیب محسوس‌تر است. همچنین، همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، میانگین شاخص مبتنی بر معیارهای آنالیز طبقات سازه در اغلب حالات آسیب برای رکورد زلزله کوبه از زلزله السنترو بیشتر بوده که بیانگر تأثیر نوع تحریک ورودی بر این شاخص می‌باشد.

جدول ۹: میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز تقریبی، نمونه و فازی طبقات سازه در حالات مختلف آسیب

حالات آسیب	میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز نمونه طبقات برای رکورد زلزله کوبه	میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز تقریبی طبقات برای رکورد زلزله کوبه	میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز فازی طبقات برای رکورد زلزله کوبه	میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز نمونه طبقات برای رکورد زلزله السنترو	میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز تقریبی طبقات برای رکورد زلزله السنترو	میانگین شاخص مبتنی بر آنالیز فازی طبقات برای رکورد زلزله السنترو
۱	۱۲۲/۴۲	۲۴/۷۱	۲۵/۸۹	۵۸/۲۳	۳۲/۴۰	۲۵/۷۴
۲	۱۲۵/۱۹	۳۲/۷۱	۳۴/۹۲	۵۳/۵۸	۳۱/۸۷	۳۲/۱۳
۳	۱۰۱/۸۹	۲۶/۴۷	۳۱/۱۵	۴۲/۳۹	۲۲/۱۱	۲۸/۲۰
۴	۴۹/۰۳	۲۵/۳۲	۴۱/۵۶	۳۹/۸۳	۱۹/۸۹	۳۵/۲۸
۵	۷۸/۲۲	۳۶/۰۳	۳۴/۶۲	۳۷/۸۴	۲۶/۶۸	۲۹/۹۴
۶	۲۲۲/۵۸	۳۸/۳۹	۴۱/۲۴	۴۵/۵۰	۳۸/۹۱	۵۳/۹۰
۷	۱۸۷	۶۳/۲۴	۸۱/۹۷	۳۵/۵۳	۳۸/۰۲	۷۸/۱۸
۸	۱۵۱/۹۷	۵۰/۷۲	۴۶/۲۶	۵۸/۲۶	۳۳/۳۶	۸۸/۱۹
۹	۱۰۳/۱	۷۶/۱۶	۱۴۲/۹۷	۱۲۸/۳۶	۷۰/۲۷	۵۶/۷۸
۱۰	۸۶/۶۵	۵۸/۳۵	۹۵/۵۲	۴۵/۸۱	۳۹/۰۷	۱۲۸/۹۹

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه، شناسایی آسیب در سازه قاب برشی با تلفیق تبدیل موجک پیوسته و معیارهای مختلف آنالیز تقریبی، نمونه و فازی انجام شد. فرکانس‌های معادل هر مقیاس موجک محاسبه شده و اختلاف مقادیر معیارهای آنالیز بین حالت‌های سالم و آسیب‌دیده برای هر مقیاس مورد بررسی قرار گرفت تا رخداد آسیب در نواحی فرکانسی حساس شناسایی شود. مقیاس دارای بیشینه اختلاف معیارهای آنالیز در حالت سالم و آسیب‌دیده تعیین و فرکانس متناظر آن با فرکانس‌های طبیعی سازه جهت شناسایی مودهای حساس به آسیب مقایسه گردید. سپس، شاخص آسیب مبتنی بر معیارهای آنالیز در همان مقیاس محاسبه و میانگین آن در طبقات مختلف برای حالات گوناگون آسیب استخراج گردید تا معیار آنالیز دارای بیشترین حساسیت در شناسایی آسیب مشخص شود.

نتایج به دست آمده از تحلیل آنالیز نمونه ضرایب تبدیل موجک پاسخ شتاب در طبقات مختلف سازه نشان می‌دهد که:

- ۱- تغییر در مقادیر آنالیزهای تقریبی، نمونه و فازی بیانگر کاهش نظم و افزایش پیچیدگی رفتاری سازه در اثر آسیب است. بنابراین، این شاخص می‌تواند به عنوان معیاری قابل اعتماد برای شناسایی آسیب در سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.
- ۲- بررسی بیشینه اختلاف معیارهای آنالیز بین حالت سالم و آسیب‌دیده اکثراً در نواحی فرکانسی ظاهر می‌شوند که به فرکانس‌های طبیعی سازه سالم نزدیک هستند. در حقیقت، تغییرات معیارهای آنالیز در مقیاس‌هایی که با مودهای ارتعاشی متناظرند، بیشترین حساسیت را نسبت به آسیب از خود نشان می‌دهند. همچنین، آنالیز نمونه در اکثر حالات و طبقات بیشترین حساسیت را در مود اول نشان داد، در حالی که آنالیز تقریبی و فازی بیشترین حساسیت را در مود سوم از خود بروز دادند.

۳- میانگین شاخص مبتنی بر آنتروپی نمونه طبقات سازه در اکثر حالات آسیب بیشتر از میانگین شاخص‌های مبتنی بر آنتروپی تقریبی و فازی است که نشان می‌دهد آنتروپی نمونه توانایی بالاتری در شناسایی رخداد آسیب دارد.

۴- نتایج این پژوهش امکان شناسایی دقیق رخداد آسیب و مودهای حساس به آسیب در سازه‌های قاب برشی را فراهم می‌کند. این یافته‌ها می‌تواند در پایش سلامت سازه‌ها برای تشخیص زودهنگام آسیب و بهبود ایمنی سازه‌ها و همچنین ارزیابی رفتار ارتعاشی سازه‌ها تحت بار لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به‌کارگیری روش‌های شناسایی سیستم و تحلیل مشارکت هر مود در پاسخ سازه، می‌توان مکان محتمل آسیب در طبقات یا بخش‌های مختلف سازه را مشخص کرد که این امر به تحقیقات آتی واگذار شده است. با این حال، این رویکرد در نهایت به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک می‌کند.

مراجع

- [1]. Ozer, E. and M.Q. Feng, *Structural health monitoring*. 2020, Elsevier. p. 345-367.
- [2]. Sun, X., et al., *A review on vibration-based damage detection methods for civil structures*. *Vibration*, 2023. **6**(4): p. 843-875.
- [3]. Wimarshana, B., N. Wu, and C. Wu, *Crack identification with parametric optimization of entropy & wavelet transformation*. *Struct. Monit. Maint*, 2017. **4**(1): p. 33-52.
- [4]. Amezcua-Sanchez, J.P. and H. Adeli, *Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2016. **23**: p. 1-15.
- [5]. Beheshti Aval, S.B., et al., *Damage detection of structures using signal processing and artificial neural networks*. *Advances in Structural Engineering*, 2020. **23**(5): p. 884-897.
- [6]. Gharehbaghi, V.R., et al., *A critical review on structural health monitoring: Definitions, methods, and perspectives*. *Archives of computational methods in engineering*, 2022. **29**(4): p. 2209-2235.
- [7]. Chen, H., Y. Yan, and J. Jiang, *Vibration-based damage detection in composite wingbox structures by HHT*. *Mechanical systems and signal processing*, 2007. **21**(1): p. 307-321.
- [8]. Alsberg, B.K., A.M. Woodward, and D.B. Kell, *An introduction to wavelet transforms for chemometricians: A time-frequency approach*. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 1997. **37**(2): p. 215-239.
- [9]. Kim, H. and H. Melhem, *Damage detection of structures by wavelet analysis*. *Engineering structures*, 2004. **26**(3): p. 347-362.
- [10]. Esmailzadeh, S., H. Ahmadi, and S.A. Hosseini, *Damage detection in concrete gravity dams using signal processing algorithms based on earthquake vibrations*. *Journal of Vibroengineering*, 2019. **21**(8): p. 2196-2215.
- [11]. Esmailzadeh, S., M.J. Mahmoodi, and M.J.S. Abad, *Application of signal processing techniques in structural health monitoring of concrete gravity dams*. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2023. **24**(7): p. 2049-2063.
- [12]. Thoriya, A., et al., *Application of wavelet transform techniques for corrosion assessment of embedded rebars in RC elements using electromechanical impedance*. *Measurement*, 2024. **226**: p. 114081.
- [13]. Liu, J.-L., et al., *Time-varying damage detection in beam structures using variational mode decomposition and continuous wavelet transform*. *Construction and Building Materials*, 2024. **411**: p. 134416.
- [14]. Demirlioglu, K. and E. Erduran, *Drive-by bridge damage detection using continuous wavelet transform*. *Applied Sciences*, 2024. **14**(7): p. 2969.
- [15]. Hanteh, M., O. Rezaifar, and M. Gholhaki, *Damage detection in precast full panel building based on experimental results and continuous wavelet analysis analytical method*. *Modares Civil Engineering journal*, 2025. **21**(1): p. 13-29.
- [16]. Tewelde, S.A. and M. Krawczuk, *Detection of Closing Cracks in Beams Based on Responses Induced by Harmonic Excitation*. *Sensors*, 2023. **24**(1): p. 247.
- [17]. de Oliveira Júnior, J.N., et al., *Entropy: From Thermodynamics to Signal Processing*.
- [18]. Lin, T.-K. and A.G. Láinez, *Entropy-based structural health monitoring system for damage detection in multi-bay three-dimensional structures*. *Entropy*, 2018. **20**(1): p. 49.
- [19]. Soofi, Y.J. and M. Bitaraf, *Output-only entropy-based damage detection using transmissibility function*. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021: p. 1-15.
- [20]. Asgarinejad, M., H. Saedinejad, and M. Bitaraf, *Entropy-Based Feature Extraction for Structural Health Monitoring: A Case Study on the Z24 Bridge in Switzerland*. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2025: p. 2650293.
- [21]. Amezcua-Sanchez, J.P., *Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations*. *Journal of Vibration and Control*, 2021. **27**(3-4): p. 426-436.

- [22]. An, Y. and J. Ou, *Structural damage localisation for a frame structure from changes in curvature of approximate entropy feature vectors*. Nondestructive Testing and Evaluation, 2014. **29**(1): p. 80-97.
- [23]. Machorro-Lopez, J.M., et al., *Entropy wavelet-based method to increase efficiency in highway bridge damage identification*. Applied Sciences, 2024. **14**(8): p. 3298.
- [24]. Civera, M., et al. *Application of the instantaneous Rényi entropy for real-time damage detection*. in *European Workshop on Structural Health Monitoring*. 2022. Springer.
- [25]. Zhou, Y., Y. Zhuang, and J.K. Sinha, *Damage Identification in Steel Girder Based on Vibration Responses of Different Sinusoidal Excitations and Wavelet Packet Permutation Entropy*. Applied Sciences, 2024. **14**(17): p. 7871.
- [26]. Tan, C., A. Elhatab, and N. Uddin, *Wavelet-entropy approach for detection of bridge damages using direct and indirect bridge records*. Journal of Infrastructure Systems, 2020. **26**(4): p. 04020037.
- [27]. Silik, A., et al., *Comparative analysis of wavelet transform for time-frequency analysis and transient localization in structural health monitoring*. Structural Durability & Health Monitoring, 2021. **15**(1): p. 1.
- [28]. Taha, M.R., et al., *Wavelet transform for structural health monitoring: a compendium of uses and features*. Structural health monitoring, 2006. **5**(3): p. 267-295.
- [29]. Zhan, Y., et al., *Detecting time-dependent coherence between non-stationary electrophysiological signals—A combined statistical and time-frequency approach*. Journal of neuroscience methods, 2006. **156**(1-2): p. 322-332.
- [30]. Martinez-Ríos, E.A., et al., *Applications of the generalized morse wavelets: A review*. Ieee Access, 2022. **11**: p. 667-688.
- [31]. Cohen, M.X., *A better way to define and describe Morlet wavelets for time-frequency analysis*. NeuroImage, 2019. **199**: p. 81-86.
- [32]. Kumar, P. and E. Foufoula-Georgiou, *Wavelet analysis in geophysics: An introduction*. Wavelets in geophysics, 1994. **4**: p. 1-43.
- [33]. Łuczak, D., *Mechanical vibrations analysis in direct drive using CWT with complex Morlet wavelet*. Power Electronics and Drives, 2023. **8**: p. 65-73.
- [34]. Silik, A., et al., *Analytic wavelet selection for time-frequency analysis of big data form civil structure monitoring*. Civil Structural Health Monitoring: Proceedings of CSHM-8 Workshop 8, 2021: p. 431-455.
- [35]. Addison, P.S., *The illustrated wavelet transform handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. 2017: CRC press.
- [36]. Jeon, G. and A. Chehri, *Entropy-based algorithms for signal processing*. Entropy, 2020. **22**(6): p. 621.
- [37]. Kuai, M., et al., *Research of planetary gear fault diagnosis based on permutation entropy of CEEMDAN and ANFIS*. Sensors, 2018. **18**(3): p. 782.
- [38]. Delgado-Bonal, A. and A. Marshak, *Approximate entropy and sample entropy: A comprehensive tutorial*. Entropy, 2019. **21**(6): p. 541.
- [39]. Richman, J.S., D.E. Lake, and J.R. Moorman, *Sample entropy*, in *Methods in enzymology*. 2004, Elsevier. p. 172-184.
- [40]. Chen, W., et al., *Characterization of surface EMG signal based on fuzzy entropy*. IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 2007. **15**(2): p. 266-272.
- [41]. Ribeiro, M., et al., *The entropy universe*. Entropy, 2021. **23**(2): p. 222.
- [42]. Lake, D.E., et al., *Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability*. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2002. **283**(3): p. R789-R797.
- [43]. Pincus, S., *Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure*. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 1995. **5**(1): p. 110-117.
- [45]. Simons, S., P. Espino, and D. Abásolo, *Fuzzy entropy analysis of the electroencephalogram in patients with Alzheimer's disease: is the method superior to sample entropy?* Entropy, 2018. **20**(1): p. 21.
- [45]. Damadipour, M., R. Tarinejad, and M.H. Aminfar, *Weighted transmissibility-based operational modal analysis for identification of structures using seismic responses*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021. **45**: p. 43-59.