

شناسایی آسیب در سازه‌ها به کمک تحریک آشوبناک و ویژگی وابستگی متقابل بهبودیافته

علیرضا بهرامی^۱، سعید اصیل قره‌باغی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- alirezabahami@email.kntu.ac.ir

۲- asil@kntu.ac.ir

چکیده:

روش‌های شناسایی آسیب بر پایه تحریک آشوبناک شامل استخراج برخی ویژگی‌ها می‌شوند که با استفاده از آن‌ها بتوان تغییرات ناشی از آسیب بر سازه را اندازه‌گیری نمود. از میان این ویژگی‌ها می‌توان به ویژگی وابستگی متقابل تعمیم یافته اشاره نمود که از حساسیت مناسب به آسیب، پیچیدگی محاسباتی پایین و حساسیت نسبتاً کم به عوامل محیطی برخوردار است. اما این ویژگی دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که کاربرد آن را منحصر به موارد خاص می‌کند. در این تحقیق، با افزودن ضریب حساسیت به آسیب و اعمال کنترل‌هایی در نحوه عملکرد این ویژگی، ضمن رفع این محدودیت‌ها، از خواص مطلوب آن در شناسایی آسیب بهره برده شده است. در سازه تیر یکسر گیردار بررسی شده، در حالتی که ویژگی وابستگی متقابل کوچکترین کاهش وابستگی را در اثر آسیب نشان نمی‌دهد، ویژگی بهبودیافته با نشان دادن کاهش وابستگی میان دو نقطه از سازه با بهبود عملکرد ۲۰ درصدی، در تشخیص آسیب موفق عمل می‌نماید.

واژگان کلیدی:

شناسایی آسیب، وابستگی متقابل تعمیم یافته، جاذب آشوبناک، تحریک آشوبناک.

* سعید اصیل قره‌باغی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

ایمیل: asil@kntu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Damage Detection in Structures Using Chaotic Excitation and Improved Generalized Interdependence Feature

A.R. Bahrami ^١, S. Asil Gharebaghi ^٢

١- Ph.D. Candidate of Structural Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

٢- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

Damage detection methods are integral components of structural health monitoring systems. Identifying damage in structures using vibration-based methods has always been one of the most important and popular topics among researchers in structural health monitoring. Vibration-based damage identification includes extracting a feature that can be used to measure the minuscule changes caused by damage to the structure. In recent years, advances have been made in using chaotic excitation and representing damage-sensitive features based on the properties of the chaotic attractor. These types of damage-sensitive features try to measure the minuscule changes caused by structural damage by comparing the chaotic attractors obtained from the structural response. The high sensitivity of chaotic systems to small changes makes attractor-based features suitable for identifying structural damage. One of the most widely used attractor-based features is the Generalized Interdependence, which has a reasonable sensitivity to damage and relatively low computational complexity. Also, the comparative nature of this feature can help identify damage in the presence of environmental variables such as noise. However, this feature has limitations that make its use exclusive to particular instances. e.g., in structures where the exact location of the damage is known beforehand. In the damage identification method presented in this research, improvements like adding a damage sensitivity factor and applying controls over the operation, have been made to this feature to remove these limitations while preserving its exceptional properties in detecting damage in structures. In the structure examined in this research, where the generalized interdependence feature does not show the slightest decrease in dependence due to damage, the improved feature detects damage by showing about ٢٠٪ better performance in finding a reduction in the dependence between two points of the structure. Two points of the structure are selected to be located at different distances from the damage. In other words, the improved feature can measure the different impacts due to damage on these two points.

Keywords: Damage Detection, Generalized Interdependence, Chaotic Attractor, Chaotic Excitation

۱ - مقدمه

یکی از متداول‌ترین روش‌های شناسایی آسیب در سازه، روش شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش می‌باشد. رویکرد شناسایی آسیب در این روش‌ها این است که آسیب باعث ایجاد تغییراتی در مشخصات فیزیکی مانند جرم، میرایی و سختی می‌گردد. این تغییرات در مشخصات فیزیکی، منجر تغییرات قابل تشخیص در پارامترهای مودال^۱ می‌گردد که این تغییرات را می‌توان با مقایسه آن‌ها قبل و بعد از ایجاد آسیب در سازه محاسبه نمود [۱]. محبوبیت آن‌ها به این دلیل است که مشخصات مودال (مانند فرکانس طبیعی، میرایی مودال، شکل‌های مودی و...) هر یک معنای فیزیکی مشخص به خود را دارند. به همین دلیل مشخصات مودال نسبت به ویژگی‌های ریاضیاتی انتزاعی که از روش‌های بر پایه مقیاس زمانی یا فرکانسی استخراج می‌شوند، از سهولت بیشتری برای تفسیر و بررسی برخوردار می‌باشند [۱].

در چهار دهه گذشته تحقیقات زیادی در زمینه روش‌های شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش^۲ انجام شده است. به نظر می‌رسد که این تحقیقات ادامه خواهند یافت زیرا هیچ کدام از روش‌های موجود، قادر به حل تمامی مسائل شناسایی آسیب با انواع مختلف آسیب‌ها و سازه‌ها نیستند. دوبلینگ و همکاران در [۲] یک گردآوری جامع را از روش‌های شناسایی آسیب بر پایه تغییرات در مشخصات مودال که تا سال ۱۹۹۸ ارائه شده بودند، تهیه نمودند. در این تحقیق بیان شد که بیشتر معایب این روش‌ها مانند وابستگی به اطلاعات آزمایش‌های قبلی و مدل‌های خطی سازه، تعداد و مکان حسگرها و حساسیت به معایب جزئی تا آن زمان مرتفع نشده‌اند و محل تحقیق و بحث میان محققان در این زمینه می‌باشند [۲]. سپس سون و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۳ نسخه بروز شده‌ای از گردآوری روش‌های بر پایه ارتعاش، که تا سال ۲۰۰۱ ارائه شده بودند را منتشر نمودند. در هر دو این تحقیقات دسته‌بندی روش‌های شناسایی آسیب، بر مبنای ویژگی‌های استخراج شده برای تشخیص آسیب انجام شده است.

در سال ۲۰۱۱ وی فَن و همکاران [۱] یک گردآوری جامع از روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای پارامتر مودال برای سازه‌ها تیر یا ورق مانند ارائه نمودند. این گردآوری با تاکید بر الگوریتم‌های شناسایی آسیب مربوط به پردازش سیگنال ارائه شد. در این تحقیق روش‌های شناسایی آسیب، بر اساس ویژگی‌های ارتعاشی در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی شده است. روش‌های بر مبنای فرکانس طبیعی، روش‌های بر مبنای شکل مودی، روش‌های بر مبنای انحنای شکل مود و روش‌هایی که همزمان از شکل‌های مودی و فرکانس‌ها استفاده می‌کنند. در این تحقیق برای نشان دادن مزایا و معایب هر یک از این چهار روش، یک بررسی مقایسه‌ای با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود^۳ در شرایط مختلف انجام گردید [۱].

در تحقیقی مشابه، در سال ۲۰۱۶، داس و همکاران [۴] به جمع‌آوری روش‌های شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش و مقایسه آن‌ها پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد که در میان تمامی روش‌های شناسایی آسیب که در مقاله بررسی شده است، تجمع مدل خودهمبسته میانگین-متحرک^۴ با مدل سری زمانی می‌تواند در تشخیص آسیب مؤثر عمل نماید. با استفاده از این روش، حتی تغییرات کوچک هم قابل شناسایی خواهند بود بدون آنکه پارامترهای محیطی اختلالی در آن ایجاد نمایند. مدل شکل مودی روشی مؤثر برای شناسایی آسیب است ولی تاثیر المان‌های محیطی مانند باد و یا ارتعاشات محیطی می‌تواند مشکلاتی را در تشخیص دقیق ایجاد نمایند [۴].

در سال ۲۰۲۰ نیکخو و همکاران در [۵] به بهبود عملکرد روش خودهمبسته برای شناسایی مودهای دینامیکی سیستم‌های خروجی محور پرداخته‌اند. در این پژوهش، برای غلبه بر محدودیت‌های روش خود همبسته، از تجزیه مود تجربی^۵ استفاده شده است. روش ارائه شده امکان استخراج پارامترهای مودال شامل فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی را از پاسخ‌های ایستا و غیرایستا، تنها با استفاده از یک حسگر فراهم می‌کند. همچنین نتایج مطالعات عددی ارائه شده، دقت بالای روش بهبودیافته در شناسایی پارامترهای مودال سیستم‌های مختلف را تایید می‌نماید [۵]. همچنین در تحقیقی مشابه در سال ۲۰۲۱

^۴ Autoregressive Moving-Average (ARMA)

^۵ Empirical Mode Decomposition (EMD)

^۱ Modal Parameters

^۲ Vibration-based

^۳ Finite Element

توسط نیکخو و همکاران [۶] به بهبود عملکرد روش خودهمبسته در سیستم‌های خروجی محور اینبار با استفاده از روش تجزیه ارتعاشات هیلبرت پرداخته شد که می‌تواند پارامترهای کلیدی مانند فرکانس و نسبت میرایی را با دقت بالا استخراج کند. نتایج نشان می‌دهند که این روش در مقایسه با سایر تکنیک‌های موجود، عملکرد قابل توجهی به خصوص در شرایط چالش‌برانگیز دارد [۶]. پس از آن و در [۷]، مطالعه‌ای مبنی بر بررسی قابلیت اطمینان روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه حوزه فرکانسی در تخمین پارامترهای مودال برای سازه‌های تحت نیروی زلزله، توسط نیکخو و همکاران [۷] منتشر شد که نشان می‌دهد نتایج بدست آمده از روش شناسایی زیرفضای تصادفی نسبت به روش تجزیه حوزه فرکانسی از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین در هر دو روش با افزایش شماره موده‌ها، دامنه خطا در فرکانس و میرایی کاهش می‌یابد [۷].

در سال ۲۰۲۱ اُچی و همکاران [۸] کاربردهای یادگیری ماشین^۱ و یادگیری عمیق در شناسایی آسیب در سازه‌های عمرانی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق بیان می‌شود که اگرچه روش‌های بر مبنای یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌توانند در استخراج ویژگی حساس به آسیب و دسته‌بندی آن‌ها بسیار مفید واقع شوند اما در عمل این روش‌ها هنوز می‌تواند بسته به مورد رفتار متفاوتی را نشان دهد چرا که نمی‌توان مجموعه‌ای از دسته‌بندی کننده ویژگی‌ها را یافت که برای هر نوع سازه عمرانی و در تمامی شرایط آسیب عملکرد مناسبی را داشته باشد. همچنین برای مرحله آموزش این روش‌ها به اطلاعات ارتعاشی از سازه آسیب ندیده و سازه آسیب دیده در شرایط آسیب متفاوت نیاز است که این اطلاعات برای سازه‌های عمرانی به ندرت در دسترس خواهد بود [۸].

در سال ۲۰۲۳، در تازه‌ترین گردآوری از روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ارتعاش، سان و همکاران [۹] به بررسی و مقایسه این روش‌ها در سازه‌هایی نظیر تیرها، خرپاها، قاب‌ها و ورق‌ها پرداختند. تمرکز این تحقیق بر روش‌های بر مبنای فرکانس طبیعی، شکل مودی، انحنای مودال، انرژی کرنشی مودال و روش‌های بر

مبنای انعطاف‌پذیری مودال و می‌باشد. در این گردآوری مزایا و معایب هریک از این روش‌ها به تفصیل بیان شده است [۹].

با توجه به خواص سیستم‌های آشوبناک نظیر حساسیت زیاد به تغییرات کوچک، ایده استفاده از تحریک آشوبناک و ویژگی‌های حساس به آسیبی که از خواص فضای حالت آشوبناک استفاده می‌کنند، به منظور شناسایی آسیب توسط محققان بسیاری بررسی شده است. در سال ۲۰۰۳ میلادی تاد و همکاران در [۱۰] به بررسی امکان استفاده از نظریه آشوب و خواص آن در روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ارتعاش پرداختند. در این تحقیق یک ویژگی بر مبنای جاذب آشوبناک^۲ که از مباحث تحلیل غیرخطی سری‌های زمانی بدست آمده بود ارائه گردید [۱۰]. در این تحقیق سازه با استفاده از خروجی یک نوسانگر آشوبناک تحریک گردید. به این ترتیب یک ورودی آشوبناک معین (با بُعد پایین) به وجود می‌آمد. ایده اصلی این تحقیق آن بود تغییرات ناشی از آسیب توسط ویژگی حساس به آسیبی تحت عنوان میانگین نسبت واریانس جاذب محلی^۳ کمی سازی می‌شوند. در این تحقیق روش بر مبنای آشوب با دو روش تغییرات در فرکانس و شکل مود تحت تغییرات محیطی مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که ویژگی میانگین نسبت واریانس جاذب محلی نسبت به دو ویژگی دیگر هم از لحاظ حدود اطمینان و هم از لحاظ عدم حساسیت زیاد به تغییرات محیطی برتری دارد. همچنین این تحقیق عنوان می‌دارد که ویژگی‌های بر پایه فضای حالت به دلیل عدم وابستگی به مدل و خطی بودن یا نبودن و یا دیگر محدودیت‌های مختص به مسئله، موارد استفاده بیشتری از دیگر روش‌ها دارند [۱۰].

در همان سال تحقیق دیگری از نیکولز و همکاران [۱۱] ارائه شد که در آن از نمونه آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار آلومینیومی استفاده شده است. در این تحقیق به عنوان تحریک آشوبناک از اطلاعات یکی از متغیرهای معادلات لورنز^۴ استفاده شده است. ویژگی حساس به آسیب در این تحقیق خطای پیش‌بینی متقابل غیرخطی^۵ در نظر گرفته شده است. روش کار این ویژگی آن است که با استفاده از اطلاعات حالت آسیب ندیده، مقادیر اطلاعات را

^۴ Lorenz Equations

^۵ Nonlinear Cross Prediction Error

^۱ Machine Learning

^۲ Chaotic Attractor

^۳ Average Local Attractor Variance Ratio (ALAVR)

برای تعداد مشخصی گام در آینده پیش‌بینی می‌نماید. هرچه آسیب در سازه بیشتر شود، خطای این پیش‌بینی بیشتر خواهد شد. نتایج این تحقیق خطای پیش‌بینی متقابل غیرخطی را به دلیل تفکیک سریع بین مجموعه اطلاعات حالت آسیب دیده و آسیب ندیده، ویژگی مناسبی برای تشخیص آسیب در سازه معرفی می‌نماید. همچنین بیان می‌شود که مخصوصاً در مقیاس‌های زمانی سریع‌تر، امکان دسته‌بندی اندازه آسیب نیز با این روش فراهم می‌آید [۱۱].

در سال ۲۰۰۴ تحقیق دیگری از نیکولز و همکاران [۱۲] این بار بر روی تیرهای کامپوزیت انجام شد. در این تحقیق به جای استفاده از اطلاعات یک یا چند نقطه از سازه و مقایسه آن‌ها در زمان‌های مختلف، اطلاعات دو نقطه در طرفین محل آسیب در یک زمان مقایسه می‌شوند. اساس کار بر آن است که آسیب ارتباط این دو نقطه و جاذب‌های بدست آمده از اطلاعات آن‌ها را مخدوش می‌کند. از ویژگی خطای پیش‌بینی متقابل غیرخطی در این تحقیق نیز برای یافتن ارتباط بین دو جاذب استفاده شده است. با استفاده از این مدل پیش‌بینی (پیش‌بینی مرتبه صفر) می‌توان بررسی نمود که آیا یک ارتباط پیوسته بین دو جاذب بدست آمده از اطلاعات دو نقطه در طرفین آسیب برقرار است یا خیر [۱۲].

در سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۸، اُوری و همکاران در [۱۳] به مقایسه دو ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل و خطای پیش‌بینی متقابل هم به صورت آزمایشگاهی با استفاده از قاب یک دهانه آلومینیومی و هم با استفاده از شبیه‌سازی یک سیستم ۵ درجه آزادی جرم و فنر پرداختند. این تحقیق با هدف اعتبارسنجی برای استفاده از ویژگی‌های بین جاذبی در روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای آشوب انجام شده است [۱۳].

در سال ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ ترکمنی و همکاران در [۱۴] برای اولین بار از سیگنال فرا آشوبناک برای تحریک سازه استفاده کردند. در این تحقیقات با استفاده از یک سیستم ۸ درجه آزادی و به کارگیری ویژگی حساس به آسیب میانگین نسبت واریانس جاذب محلی، مقایسه‌ای بین اعمال تحریک به صورت آشوبناک و فرا آشوبناک به سازه به عمل آمده است. در این تحقیقات، نشان داده شده است که استفاده از تحریک فرا آشوبناک باعث ایجاد حساسیت

بیشتری نسبت به تغییرات کوچک آسیب در مقایسه با سیگنال آشوبناک می‌شود [۱۵].

در سال ۲۰۱۶ نیز ترکمنی و همکاران [۱۶] یک روش بدون وقفه را برای شناسایی آسیب با استفاده از تخمین آماری منتشر نمودند. در این تحقیق از فیلتر کالمن تعمیم یافته به دلیل طولانی بالای آن برای پیش‌بینی و تقریب، برای پایش بی‌وقفه تغییرات ناشی از آسیب در سازه استفاده شد [۱۶].

با استفاده از این مجموعه تحقیقات در اواخر سال ۲۰۲۲ اسلوبودا و همکاران [۱۷] ویژگی حساس به آسیبی به نام بردارهای تغییرشکل مرزی^۱ را ارائه کردند. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی سیستم جرم و فنر ۸ درجه آزادی و همچنین یک تیر یکسر گیردار، کارایی این ویژگی در شناسایی آسیب نشان داده شده است. در این تحقیق اسلوبودا و همکاران روشی برای یافتن اندازه و مکان آسیب در سازه‌های خطی مدل‌سازی شده پیشنهاد نموده‌اند. به دلیل استفاده از مقاطع پوانکره^۲ در این تحقیق برای یافتن نمایی از فضای حالت دینامیک سیستم، این روش حساسیت بالایی نسبت به آسیب ندارد همچنین کاربرد آن تنها در سیستم‌های خطی، موارد استفاده از این روش را محدود می‌نماید [۱۷].

در تحقیق حاضر، با بهبود ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل تعمیم‌یافته، ضمن رفع محدودیت‌های این ویژگی که کاربرد آن را محدود به برخی موارد خاص می‌کند، از خواص مطلوب آن نظیر پیچیدگی محاسباتی نسبتاً کم و حساسیت پایین به متغیرهای محیطی در روش شناسایی آسیب بهره برده شده است. در ادامه و در بخش بعدی مبانی و نحوه عملکرد روش شناسایی آسیب ارائه شده و همچنین ویژگی وابستگی متقابل بهبود یافته، بیان می‌شود. سپس در انتها به مقایسه و بررسی نتایج حاصل از اعمال این روش به سازه تیر یکسر گیردار آلومینیومی پرداخته خواهد شد.

۲ - مبانی روش شناسایی آسیب

به منظور شناسایی آسیب در سازه‌ها به کمک تحریک آشوبناک، در گام نخست نیاز است که با توجه به مشخصات سازه مد نظر یک تحریک آشوبناک معین با بُعد پایین تنظیم شود. استفاده از

^۲ Poincare Sections

^۱ Boundary Transformation Vectors (BTV)

هر تحریک آشوبناکی که به سازه اعمال شود دارای نماهای لیاپانوف مشخصی است. سازه نیز به عنوان یک فیلتر برای این تحریک، نماهای لیاپانوف مختص به خود را دارا می‌باشد. هر گونه تغییر در مشخصات سازه نظیر جرم، سختی و... این نماها را دستخوش تغییر خواهد نمود [۱۱]. روابط (۱) و (۲) به ترتیب نمایانگر نماهای لیاپانوف تحریک و سازه می‌باشند. در این روابط d_e بُعد سیگنال تحریک و d_s بُعد فیلتر می‌باشد.

$$\lambda_1^e > \lambda_2^e > \dots > \lambda_{d_e}^e \quad (1)$$

$$\lambda_1^s > \lambda_2^s > \dots > \lambda_{d_s}^s \quad (2)$$

برای ایجاد یک تحریک مناسب دو ضابطه باید رعایت شوند. اول، به منظور آن که تغییرات سازه در پاسخ دینامیکی آن مشخص شوند، حداقل می‌بایست منفی‌ترین نمای لیاپانوف تحریک، کوچک تر از بزرگترین نمای لیاپانوف سازه باشد (رابطه (۳)). اگر $\lambda_{d_e}^e$ کوچک تر شده و از نمای i ام سازه (λ_i^s) نیز کمتر شود آن‌گاه ضریب تشریک مود i ام در دینامیک سازه افزایش خواهد یافت [۱۷].

$$\lambda_{d_e}^e < \lambda_i^s \quad (3)$$

دوم، جاذب بدست آمده از سازه تحریک شده می‌بایست در فضایی با بُعد پایین تشکیل شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، سیستم‌های با بُعد بالا ($D > 4$) هنگام به‌کارگیری تحلیل‌های بر مبنای جاذب، نتایج ضعیفی را بدست می‌دهند [۱۱]. در اینجا برای یافتن بُعد جاذب حاصل شده از پاسخ، از تقریب کاپلن-یورک^۵ استفاده می‌شود. این تقریب با استفاده از رابطه (۴) نماهای لیاپانوف یک سیستم را به بُعد آن مرتبط می‌کند. که در آن M تعداد نماهایی است که می‌توانند با هم جمع شوند قبل از آن که مجموع آن‌ها منفی گردد. λ_n نماهای لیاپانوف و D_L بُعد لیاپانوف سیستم می‌باشد [۱۰].

$$D_L = M + \frac{\sum_{n=1}^M \lambda_n}{|\lambda_{M+1}|} \quad (4)$$

سیستم‌های آشوبناک با بُعد بالا در تحلیل‌های بر مبنای جاذب^۱ به دلیل عدم توانایی آن‌ها در پُر کردن جاذب باعث ایجاد نتایج ضعیف خواهد شد [۱۲]. پس از اعمال تحریک تنظیم شده و ثبت پاسخ سازه به صورت یک سری زمانی، در گام بعد، شکل کیفی فضای حالت آشوبناک به کمک روش‌های بازسازی فضای حالت، ساخته خواهد شد. سپس آسیب وارد شده به سازه به کمک ویژگی حساس به آسیب، از تحلیل این فضاها حالت بازسازی شده تشخیص داده خواهد شد. در ادامه مبانی هر یک از این مراحل به طور مشخص برای روش شناسایی آسیب ارائه شده در این تحقیق بیان خواهند شد.

۲-۱- تنظیم تحریک آشوبناک به منظور اعمال به سازه

در روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ارتعاش، معمولاً، تحریک به صورت سیگنال‌های تصادفی پهن‌بند^۲ در نظر گرفته می‌شود. طبیعت پهن‌بند این تحریک‌ها پاسخ مودال کامل را تضمین می‌نماید که برای رویکردهای فرکانسی به منظور شناسایی سیستم یا استخراج ویژگی ایده‌آل می‌باشد. از طرفی دیگر سیگنال‌های آشوبناک نیز عمدتاً دارای طیف فرکانسی پهن‌بند می‌باشند ولی بر خلاف سیگنال‌های تصادفی، معین^۳ هستند. این بدان معناست که برخلاف مواردی مانند نوفه سفید که از یک فرایند کاملاً تصادفی نشأت می‌گیرند، به منظور تشکیل سیگنال‌های آشوبناک نیاز به معادلات غیر خطی مشخصی می‌باشد و رفتار آن‌ها حداقل در کوتاه مدت قابل پیش‌بینی است. همچنین در نوفه سفید هیچ الگوی مشخصی وجود ندارد ولی معادلات حاکم بر سیستم‌های آشوبناک الگوهای مشخص و چرخه‌های غیر دوره‌ای را دنبال می‌کند. این ویژگی به همراه طبیعت فرکتالی^۴ جاذب‌های آشوبناک باعث ایجاد یک توزیع با بُعد پایین میان خطوط مسیر در فضای حالت خواهد شد که این مورد امکان طبقه‌بندی بر مبنای جاذب را فراهم می‌آورد [۱۱]. علاوه بر آن، سیستم‌های آشوبناک به دلیل داشتن نمای لیاپانوف مثبت حساسیت بالایی به تغییرات کوچک دارند. از طرفی کوچک بودن تغییرات ناشی از آسیب در سازه، بیش از پیش آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب جهت تحریک سازه بدل خواهد نمود.

^۴ Fractal

^۵ Kaplan-Yorke Conjecture

^۱ Attractor-based

^۲ Broadband

^۳ Deterministic

۲ — بازسازی کیفی جاذب آشوبناک با استفاده از اطلاعات سری زمانی پاسخ

دو روش اصلی به منظور بازسازی کیفی جاذب آشوبناک، با استفاده از اطلاعات سری زمانی، روش مختصات تأخیر یافته^۱ و تحلیل طیف منفرد^۲ می‌باشند [۱۰]. در این تحقیق، به دلیل پیچیدگی محاسباتی کمتر و دقت بالاتر از روش مختصات تأخیر یافته به منظور بازسازی جاذب آشوبناک استفاده شده است. این روش در واقع حالت تعمیم یافته‌ای از نظریه تعبیه‌سازی تاکینز^۳ می‌باشد [۱۸] و [۱۹]. در این روش اطلاعات سری زمانی در مقابل نسخه تأخیر یافته‌ای از خودش ترسیم می‌گردد. دو متغیر اصلی که باید برای به‌کارگیری این روش مشخص شوند، بُعد تعبیه‌سازی (m) و گام زمانی تأخیر (T) می‌باشند (رابطه (۷)). به منظور اینکه فضای حالت بازسازی شده با این روش، دینامیک سیستم را به طور کیفی حفظ نماید، ثبت سری زمانی با گام زمانی یکسان و مشخص کردن مقادیر مناسب برای m و T الزامی می‌باشد. برای یافتن این دو متغیر اسکالر روش‌های زیادی ارائه شده است، اما مورد استفاده‌ترین روش به منظور تخمین مقدار m ، روش همسایه‌های کاذب و برای T روش اطلاعات متقابل میانگین و تابع خودهمبستگی^۴ می‌باشد [۲۰]. در تحقیق حاضر از روش اطلاعات متقابل میانگین به منظور یافتن T استفاده شده است.

$$\mathbf{x}_i = (x_i, x_{i+T}, \dots, x_{i+(m-1)T}) \quad (7)$$

۲ — ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل تعمیم یافته و بهبودهای اعمال شده بر آن

همانطور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، روال عملکرد این ویژگی به صورت مقایسه دو جاذب و یافتن وابستگی میان آن‌هاست. در واقع اگر روش مختصات تأخیر یافته، برای دو سری زمانی با بُعد تعبیه‌سازی m و پارامتر تأخیر T به کار گرفته شود حاصل بردارهای فضای حالتی به صورت $\mathbf{x}_i = (x_i, x_{i+T}, \dots, x_{i+(m-1)T})$ و $\mathbf{y}_i = (y_i, y_{i+T}, \dots, y_{i+(m-1)T})$ خواهد بود. مجموعه این بردارهای فضای حالت می‌توانند در قالب ماتریس‌هایی به صورت $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$ و $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n)$ نوشته شوند [۲۱].

^۱ Takens Embedding Theorem

^۴ Autocorrelation Function

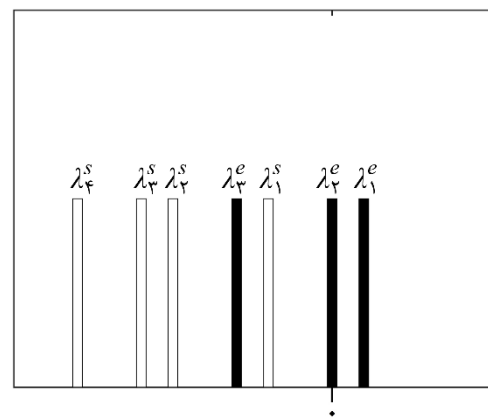
اگر نمودار حاصل از ترکیب نماهای لیپانوف تحریک و سازه را با رعایت شرط اول به صورت شکل (۱) در نظر بگیریم، با توجه به رابطه (۴)، برای داشتن پاسخی با کمترین بُعد، لازم است رابطه زیر برقرار باشد [۱۱].

$$|\lambda^e| < |\lambda^s| \quad (5)$$

در این صورت با این فرض که تحریک از خروجی یک فرآیند پیوسته در زمان بدست آمده باشد (یک نمای لیپانوف صفر داشته باشد) کمترین بُعد ممکن به صورت زیر نوشته خواهد شد [۱۷].

$$D = 2 + \frac{\lambda^e}{|\lambda^s|} \quad (6)$$

در این صورت اگر λ^e از $|\lambda^s|$ بزرگتر شود، بُعد جاذب افزایش خواهد یافت و در نتیجه جاذب پیچیده‌تری از پاسخ سازه بدست می‌آید. که این موضوع تحلیل جاذب را دشوارتر خواهد نمود. اما به منظور تحلیل جاذب، ابتدا می‌بایست روش مورد استفاده برای تشکیل آن‌ها از سری‌های زمانی پاسخ شرح داده شود. در بخش بعد به توضیح این روش‌ها و نحوه عملکرد آن‌ها به‌طور کامل پرداخته خواهد شد.



شکل ۱: برهم‌کنش نماهای لیپانوف برای سیگنال فیلتر شده با رعایت هر دو ضابطه برای تنظیم تحریک آشوبناک

^۱ Delayed Coordinates

^۲ Singular Spectrum Analysis

$$I_{GID} = \sum_n \frac{R_n(\mathbf{X}) - D_n(\mathbf{X}|\mathbf{Y})}{R_n(\mathbf{X}) - D_n(\mathbf{X})} \quad (11)$$

بنابر تعریف این ویژگی، در محدوده نوز قابل قبول، $0 < I_{GID} < 1$ می‌باشد. $I_{GID} \approx 0$ بیانگر عدم وابستگی میان جاذب $\mathbf{Y}$ و $\mathbf{X}$ است و $I_{GID} = 1$ نشانگر رابطه کاملاً درگیر^۲ می‌باشد. در تحقیقات انجام گرفته، از این ویژگی زمانی استفاده می‌شود که مکان آسیب در سازه مشخص باشد و به کمک آن وابستگی جاذب‌های نقاط قبل و بعد از محل آسیب مقایسه می‌شود. از میان این تحقیقات می‌توان به [۲۱] و [۱۳] اشاره نمود که در آن‌ها به کمک این ویژگی به شناسایی آسیب در محل اتصالات قاب فلزی و سیستم جرم و فنر پرداخته شده است. اما در بسیاری از سازه‌ها امکان شناسایی محل آسیب از قبل میسر نیست و یا در برخی از سازه‌ها امکان بررسی نقاط قبل و بعد از مکان آسیب فراهم نمی‌باشد. به عنوان مثال بررسی جاذب‌های قبل و بعد از محل جداشدگی تیر یکسری‌دار از محل تکیه‌گاه، ممکن نیست. همین امر استفاده از این ویژگی را با وجود داشتن مزایایی نظیر پیچیدگی ریاضیاتی و هزینه محاسبات نسبتاً کم و همچنین نیاز به تعداد حسگرهای پایین، محدود به موارد خاص می‌نماید. لذا در این تحقیق با اعمال بهبودهایی بر روند عملکردی این ویژگی ضمن حفظ مزایای آن، این محدودیت‌ها تا حدود زیادی از میان برداشته شده‌اند.

بهبودهای اعمال شده بر این ویژگی شامل دو مورد می‌باشد. مورد اول تعبیه کردن عددی کوچک تحت عنوان ضریب حساسیت به آسیب (δ) که به وسیله آن می‌توان حساسیت ویژگی به تغییرات در جاذب‌ها را کنترل نمود. هرچه ضریب حساسیت عدد بزرگتری باشد، حساسیت ویژگی به تغییرات در جاذب‌ها کمتر خواهد بود. بدیهی است در صورت انتخاب δ بسیار بزرگ، عملکرد ویژگی بهبودیافته به سمت ویژگی وابستگی متقابل معمولی میل خواهد نمود. در واقع این ضریب به صورت حداکثر فاصله قابل قبول در هنگام تشکیل نزدیک‌ترین همسایگی‌ها ($D_t(\mathbf{X})$) ظاهر می‌شود و بر خلاف ویژگی اصلی که تعداد را ملاک تشکیل نزدیک‌ترین همسایگی قرار می‌دهد، در ویژگی بهبود یافته، این ضریب، کنترل‌کننده نقاطی است که در همسایگی‌ها قرار خواهند گرفت. رعایت این مورد سبب

بر اساس الگوریتم ارائه شده توسط آرنهولد و همکاران در [۲۲]، به منظور یافتن وابستگی میان دو جاذب با استفاده از این ویژگی، ابتدا دو نقطه تصادفی دلخواه به عنوان مثال در زمان t بر روی جاذب‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس k نزدیک‌ترین همسایه به نقاط دلخواه $\mathbf{x}_t$ و $\mathbf{y}_t$ ، به ترتیب با اندیس‌های زمانی $p_{t,j}$ و $q_{t,j}$ ، بر روی جاذب‌ها مشخص می‌گردد. این همسایگی‌ها با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی^۱ نقاط از نقطه دلخواه تشکیل می‌شوند و از آن‌ها نقاطی که در مسیر حرکت جاذب قرار دارند بنا بر اصلاح تیلر [۲۳] خارج خواهند شد [۲۲]. پس از تشکیل نزدیک‌ترین همسایگی برای هر جاذب، با استفاده از اطلاعات آن‌ها دو شاخص $D_t(\mathbf{X})$ و $D_t(\mathbf{X}|\mathbf{Y})$ از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌گردد.

$$D_t(\mathbf{X}) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{p_{t,j}})^2 \quad (8)$$

$$D_t(\mathbf{X}|\mathbf{Y}) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{q_{t,j}})^2 \quad (9)$$

تنها تفاوت دو شاخص فوق آن است که در محاسبه $D_t(\mathbf{X}|\mathbf{Y})$ از اندیس‌های زمانی نزدیک‌ترین همسایگی ایجاد شده در جاذب $\mathbf{Y}$ به منظور محاسبه مجموع میانگین مربعات فواصل استفاده شده است. به بیانی دیگر به جای استفاده از نزدیک‌ترین همسایگی تشکیل شده در جاذب $\mathbf{X}$ ، از معادل‌های زمانی نزدیک‌ترین همسایگی در جاذب $\mathbf{Y}$ ، و نقاطی که با این اندیس‌های زمانی بر روی جاذب $\mathbf{X}$ ایجاد می‌شوند، استفاده می‌گردد. سپس یک شاخص دیگر که فاصله نقطه دلخواه انتخاب شده را از مجموعه‌ی r نقطه تصادفی بر روی همان جاذب را تخمین می‌زند، مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود (معمولاً $r \gg k$ انتخاب می‌شود که از خطاهای آماری جلوگیری شود).

$$R_t(\mathbf{X}) = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r (\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_j)^2 \quad (10)$$

با استفاده از این سه شاخص و محاسبه آن‌ها برای تعداد n نقطه دلخواه ویژگی وابستگی متقابل تعمیم‌یافته به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۱]:

^۲ Fully-coupled

^۱ Euclidean Distance

آسیب استفاده می‌شود. در ادامه به توضیح مراحل آن پرداخته خواهد شد.

۳ - شناسایی آسیب در مدل تیر یکسر گیردار به کمک ویژگی بهبود یافته

سازه در نظر گرفته شده، یک تیر یکسر گیردار آلومینیومی می‌باشد که با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی شده است. این تیر دارای ۰/۵ متر طول، ۰/۰۵ متر عرض و $3 \times 10^{-3} \times 175$ متر ضخامت می‌باشد و آسیب در آن به صورت جداسازی تیر از محل تکیه‌گاه گیردار مدل‌سازی شده است. همچنین درصد آسیب به صورت نسبت تعداد گره‌های جدا شده به تعداد کل گره‌ها در محل تکیه‌گاه مشخص شده و در بازه‌های ۵ درصدی از ۰ تا ۳۵ درصد متغیر است. مشخصات مصالح آلومینیومی شامل مدول یانگ $E = 73 \text{ GPa}$ ، جرم حجمی $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ و نسبت پواسون $\nu = 0.33$ می‌باشد. همچنین تحریک آشوبناک در فاصله ۰/۱۵ متر از تکیه‌گاه گیردار به صورت بار متمرکز، در راستای محور Z و در وسط عرض تیر اعمال شده است.

مدلسازی این تیر در ابتدا به صورت سه بعدی با المان‌های خطی و ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش یافته و با در نظر گرفتن ۵ حالت آسیب (جدول (۱)) در سطح مقطع تیر و در محل تکیه‌گاه انجام شده است. همچنین برای هر یک از حالات آسیب، درصد آسیب از ۰ تا ۳۵ درصد در بازه‌های ۵ درصدی افزایش یافته است. یک صفحه صلب در محل تکیه‌گاه به منظور امکان برخورد گره‌های جدا شده از سطح مقطع تیر در نظر گرفته شده است. نتایج مدل‌های ساخته شده (دو بعدی و سه بعدی) با استفاده از نتایج ارائه شده در [۱۰] و نتایج تحلیلی (در حالت آسیب ندیده) صحت‌سنجی شده‌اند. با توجه به نتایج شکل (۳) کمترین تغییرات در مقادیر وابستگی میان جاذب‌ها در حالت ۱ آسیب (آسیب در تمام ضخامت) اتفاق افتاده است. از این رو این حالت به عنوان حالت بحرانی در نظر گرفته شده و به منظور کاهش حجم محاسبات، مدل دو بعدی با المان‌های درجه ۲ مربعی و مثلثی با انتگرال‌گیری کاهش یافته جایگزین مدل سه بعدی شده

می‌شود تأثیر شکل جاذب و تعداد نقاط مورد استفاده در تشکیل آن بر همسایگی‌های تشکیل شده به‌طور محسوسی کاهش یابد و تنها نقاطی در همسایگی‌ها قرار گیرند که واقعا به یکدیگر نزدیک باشند. به منظور تعیین این ضریب، پس از تشکیل چند همسایگی در قسمت‌های مختلفی از جاذب X (با تعداد نقاط مشخص)، می‌توان از ماکزیمم فواصل ایجاد شده در این همسایگی‌ها به عنوان تخمین اولیه از این ضریب استفاده نمود. به‌طور کلی این ضریب مابین ماکزیمم مطلق و میانگین ماکزیمم فواصل در همسایگی‌های تشکیل شده می‌باشد. بدیهی است که هر چه تعداد این همسایگی‌های بیشتر باشد تخمین دقیق‌تر خواهد بود.

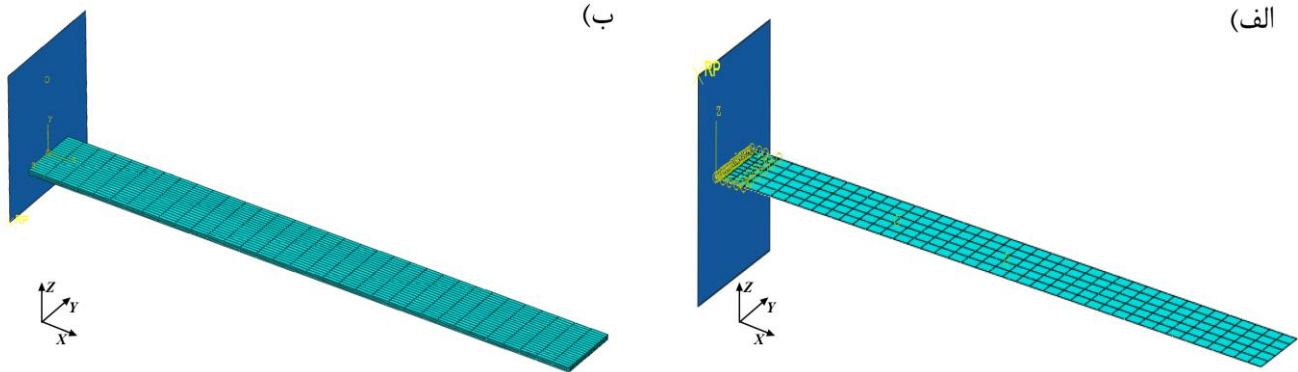
مورد دوم، کنترل نزدیک ماندن نقاط در نزدیک‌ترین همسایگی تشکیل شده می‌باشد. به این صورت که با جلو بردن نقاط داخل همسایگی در چند گام زمانی آینده در مسیر حرکت جاذب، چک می‌شود که همسایگی انتخاب شده در فاصله مشخص از یکدیگر باقی خواهند ماند یا خیر و نقاطی که در فاصله مشخص باقی نمانده‌اند از همسایگی خارج خواهند شد. در این صورت نقاطی که به دلایلی مانند کم بودن بُعد تعبیه‌سازی (m) یا مسیر حرکت خاص جاذب در همسایگی یکدیگر قرار گرفته‌اند و اصطلاحاً همسایه کاذب می‌باشند در هیچ‌یک از همسایگی‌های انتخاب شده قرار نخواهند گرفت.

کاربرد توأمان این دو مورد تضمین می‌نماید که نقاط در نزدیک‌ترین همسایگی‌های ایجاد شده، به درستی انتخاب شوند و همچنین تأثیر عواملی مانند شکل جاذب، بُعد تعبیه‌سازی، تعداد نقاط برای تشکیل جاذب و مسیر حرکت آن بر عملکرد ویژگی کاهش یابد. این موارد باعث عملکرد بهتر و دقیق‌تر ویژگی و حساسیت بیشتر آن به تغییرات جاذب‌ها خواهد شد. از سوی دیگر با افزایش دقت و بهبود عملکرد این ویژگی، محدودیت‌هایی نظیر اجبار به انتخاب دو نقطه برای مقایسه که دقیقا در اطراف آسیب باشند برطرف خواهد شد و با انتخاب دو نقطه دلخواه از سازه و مقایسه وابستگی آن‌ها می‌توان وجود آسیب در سازه را تشخیص داد. به عنوان نمونه، در تحقیق حاضر، آسیب در تیر یکسر گیردار آلومینیومی به کمک ویژگی بهبود یافته تشخیص داده می‌شود. در این فرآیند از جاذب‌های بدست آمده از پاسخ دو نقطه از ابتدا و انتهای تیر به منظور تشخیص این

^۲ Poisson's Ratio

^۱ Young's Modulus

است. مش بندی مدل دو بعدی از نظر تعداد و نوع المان به صورت آنچه در [۱۰] ارائه شده انجام پذیرفته است.



شکل ۲: الف) تیر یکسر گیردار (آلومینیومی مدل سازی شده الف) در حالت دو بعدی و ب) در حالت سه بعدی

شکل ۳: تفاوت مقادیر ویژگی وابستگی متقابل بهبود یافته با ضریب حساسیت $\delta = 5 \times 10^{-6}$ برای حالات مختلف آسیب از صفر تا ۳۵ درصد آسیب

جدول ۱: حالات مختلف آسیب در نظر گرفته شده در مدل سه بعدی
Table ۱: Different damage scenarios considered in the ۳D model

Damage Scenarios	Method of separating nodes in the cross-section of the beam at the support location
State ۱	
State ۲	
State ۳	
State ۴	
State ۵	

در تیر مذکور، فرکانس های طبیعی برای دو مود اول (دو مود اول در روابط مورد نیاز می باشد) به ترتیب معادل $f_1 = 10.76 \text{ Hz}$ و $f_2 = 67.60 \text{ Hz}$ می باشند. به منظور محاسبه نماهای لیاپانوف سازه به عنوان یک فیلتر و با در نظر گرفتن میرایی متناسب با ماتریس جرم و سختی، برای سازه فوق داریم:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (12)$$

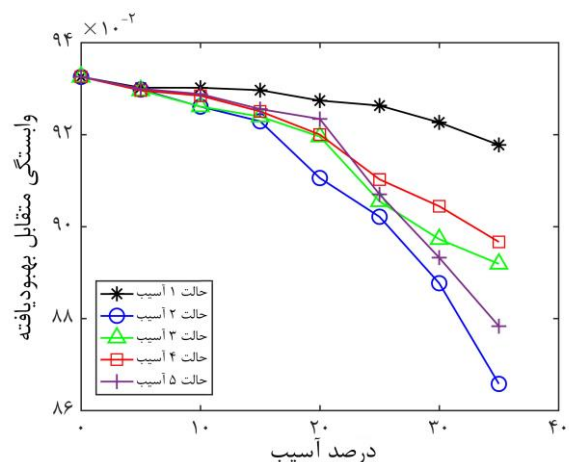
با توجه به روش ارائه شده در [۲۴] برای α و β ثابت، رابطه (۱۲) امکان توصیف سازه در مختصات مودال با مدل میرایی ویسکوز را به صورت رابطه (۱۳) فراهم می آورد.

$$2\zeta_k(2\pi f_k) = \alpha + \beta(2\pi f_k)^2 \quad (13)$$

برای هر یک از k مود سازه و فرکانس های مربوط به آن با استفاده از رابطه فوق، طیف لیاپانوف سازه به صورت رابطه (۱۴) نوشته می شود [۱۰]. این رابطه به ازای هر مود ارتعاشی یک نمای لیاپانوف بدست می دهد.

$$\lambda_k^s = -\left(\frac{1}{2}\alpha + \beta(\pi f_k)^2\right) \quad (14)$$

با داشتن فرکانس های طبیعی تیر یکسر گیردار ($f_1 = 10.76 \text{ Hz}$) و $f_2 = 67.60 \text{ Hz}$) و با فرض نسبت میرایی بدون بُعد $\zeta_k = 0.01$



برای تمامی مودها، با استفاده از روابط فوق دو نمای اول لیاپانوف سازه به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\lambda_1^s = -0.168, \quad \lambda_2^s = -4.25 \quad (15)$$

در این تحقیق به منظور ایجاد تحریک از حالت آشوبناک معادلات دافینگ (رابطه (۱۶)) استفاده شده است. همچنین با توجه به دو معیاری که برای تنظیم تحریک آشوبناک در قسمت‌های قبل ارائه شدند، به منظور تنظیم نماهای لیاپانوف این تحریک از یک ضریب (ε) در این معادلات استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{x}_1 &= x_1 \\ \varepsilon \dot{x}_2 &= -ax_1 + b(x_1 - x_1^2) + c \sin(x_1) \\ \varepsilon \dot{x}_3 &= \omega \end{aligned} \quad (16)$$

در رابطه فوق x_i متغیرهای حالت و $\dot{x}_i$ مشتق زمانی این متغیرها می‌باشند. همچنین ضریب ε به منظور اعمال کنترل بیشتر در تنظیم نماهای لیاپانوف افزوده شده است. ضرایب روابط فوق باید طوری تنظیم شوند که اولاً معادلات در حالت آشوبناک باشند و ثانیاً رابطه میان نماهای لیاپانوف آن و نماهای لیاپانوف سازه، روابط (۳) و (۵) را ارضا نماید. در صورت انتخاب نامناسب این ضرایب، تحریک حاصله برای اعمال به سازه به منظور شناسایی آسیب مناسب نخواهد بود. در رابطه (۱۶) با قرار دادن مقادیر $a = 0.1$, $b = 0.5$, $c = 0.15$, $\omega = 0.8$ و $\varepsilon = 0.2$ و به کارگیری الگوریتم ارائه شده توسط ولف و همکاران در [۲۵]، و لحاظ نمودن دقت 10^{-3} نماهای لیاپانوف تحریک به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\lambda_1^e = 0.42, \quad \lambda_2^e = 0.0, \quad \lambda_3^e = -0.92 \quad (17)$$

مقادیر بدست آمده برای نماهای لیاپانوف سازه و تحریک روابط (۳) و (۵) را ارضا می‌کنند. همچنین با استفاده از رابطه (۶) بُعد سیگنال فیلتر شده $D = 2/62$ بدست می‌آید و سیگنال فیلتر شده با بُعد

پایین خواهد بود. پس می‌توان نتیجه گرفت که تحریک آشوبناک در نظر گرفته شده برای سازه مناسب است.

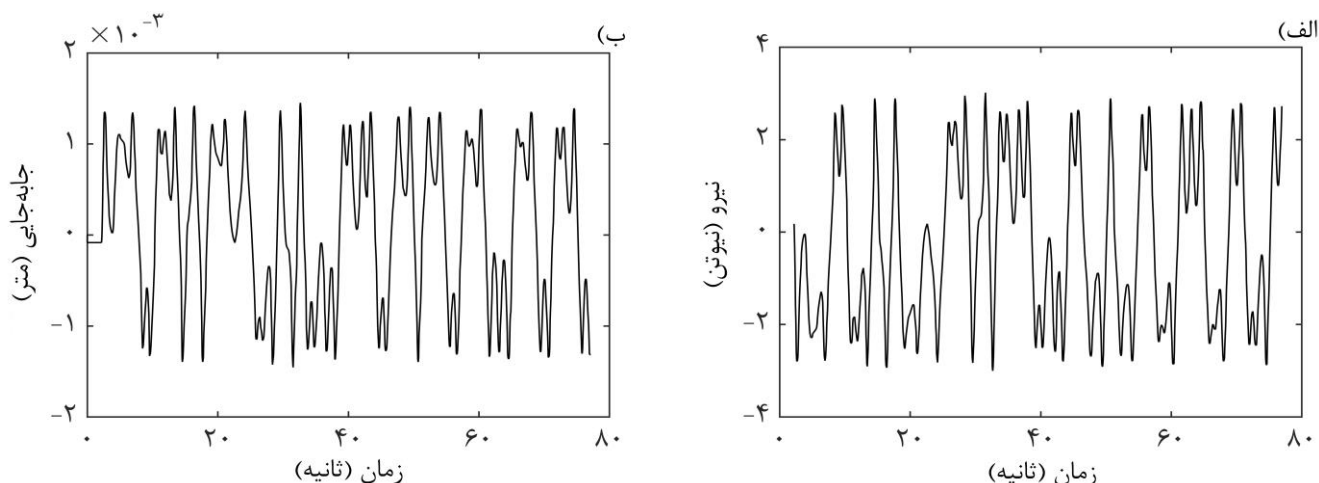
تابع تحریکی نهایی که بر سازه اعمال می‌شود، شامل حاصل ضرب مقادیر متغیر حالت اول (x_1) در ضریب مقیاس مناسب ($F = 1N$) می‌باشد. با توجه به بدون واحد بودن مقادیر معادلات دافینگ، وظیفه این ضریب، مقیاس کردن مقادیر به واحد نیرویی مناسب مورد نیاز برای سازه است [۱۰]. تحریک در نظر گرفته شده و پاسخ سازه به آن به ترتیب در شکل (۴ - الف) و (۴ - ب) آورده شده‌اند.

آسیب در تحقیق حاضر به صورت جداسازی تیر از محل تکیه‌گاه اعمال شده است (مجموعاً ۲۰ گره در محل تکیه‌گاه وجود دارد). با قرار دادن صفحه صلب در محل تکیه‌گاه امکان برخورد المان‌های جدا شده با صفحه صلب در حین اعمال تحریک پیش‌بینی شده است. آسیب از صفر درصد تا ۳۵ درصد با گام ۵ درصدی در هر مرحله افزایش می‌یابد (جدول (۲)).

جدول ۲: مشخصات آسیب وارد شده به تیر به صورت جداسازی گره‌های گیردار در تکیه‌گاه

Table ۲: Characteristics of the damage applied to the beam by separating the fixed nodes at the clamped end

Damage Percent	Number of Separated Nodes	Damage Case
۰٪	۰	۰
۵٪	۱	۱
۱۰٪	۲	۲
۱۵٪	۳	۳
۲۰٪	۴	۴
۲۵٪	۵	۵
۳۰٪	۶	۶
۳۵٪	۷	۷



شکل ۴: الف) تحریک آشوبناک تنظیم شده با استفاده از خروجی معادله دافینگ ب) جابه‌جایی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار آسیب ندیده به این تحریک

۳-۱- تحلیل و بررسی نتایج حاصل از به‌کارگیری ویژگی
ماندن همسایگی‌های تشکیل شده در ۳ گام زمانی آینده انجام شده است. با استفاده از مقادیر ارائه شده در جدول (۳) برای متغیرهای مورد نیاز، به مقایسه جاذب‌های بدست آمده از پاسخ سازه در دو نقطه مشخص شده با استفاده از ویژگی بهبودیافته و ویژگی اصلی پرداخته شده است. نتایج حاصل از عملکرد هریک از ویژگی‌ها در شکل (۵)، و شکل (۶) ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۵ - الف)، با به‌کارگیری ویژگی بهبودیافته با ضریب حساسیت $\delta = 2 \times 10^{-6}$ ، در اثر افزایش مقدار آسیب، وابستگی دو نقطه بررسی شده از سازه کاهش یافته است. نزول در مقدار وابستگی دو نقطه تقریباً به صورت یک‌نوا می‌باشد که با توجه به ثابت بودن میزان تغییرات آسیب، بسیار مناسب است. جدول ۳: مؤلفه‌های مورد نیاز و مقادیر آن‌ها به منظور ثبت، تشکیل و مقایسه جاذب‌های بدست آمده از پاسخ سازه

Table ۳: Required parameters and their values for forming, and comparing attractors obtained from the structural response

Value	Parameter
۱.۶	Number of points time series points (N_T)
۵۰۰	Number of points for attractor comparison (N)
۱۰۰	Number of points in nearest neighbour for main feature (n)
۶۰	Delay parameter (T)

۳-۱- تحلیل و بررسی نتایج حاصل از به‌کارگیری ویژگی

در هر مرحله از آسیب، سری‌های زمانی پاسخ سازه به تحریک آشوبناک در انتهای آزاد و ۱/۲۵ سانتی‌متری از تکیه‌گاه گیردار، در مرکز تیر ثبت گردیده است. هر یک از این سری‌های زمانی در مجموع دارای ۱۰۵ نقطه می‌باشند که در فواصل زمانی یکسان برداشت می‌شوند. به منظور بازسازی شکل کلی فضای حالت با استفاده از روش مختصات تأخیر یافته در ابتدا نیاز به تعیین مؤلفه‌های تأخیر و بُعد تعبیه‌سازی می‌باشد. با استفاده از روش اطلاعات متقابل میانگین مؤلفه تأخیر برای استفاده از این روش مقدار $T = 60$ بدست آمده است. همچنین به منظور کاهش هزینه محاسباتی بُعد تعبیه‌سازی $m = 2$ در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر کمینه فاصله زمانی بین نقاط و نزدیک‌ترین همسایگی‌های تشکیل شده (بازه تیلر [۲۳]) برابر با ۳۰۰ گام زمانی در نظر گرفته شده است [۱۰].

با توجه به موارد ذکر شده در [۲۶] تعداد نقاط در هر همسایگی برای مقایسه دو جاذب تقریباً برابر با ۰/۱ درصد از کل نقاط سری زمانی در نظر گرفته شده است (متغیر تعداد همسایگی‌ها در روش بهبودیافته مورد نیاز می‌باشد). همچنین تعداد همسایگی‌های مورد نیاز در فرآیند مقایسه با توجه به موارد ذکر شده در [۱۰] معادل ۵ درصد کل نقاط سری زمانی قرار داده شده است. مؤلفه‌های مورد نیاز برای انجام فرآیند مقایسه و مقادیر آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌اند. در ویژگی بهبودیافته مقدار متغیر حساسیت $\delta = 2 \times 10^{-6}$ و

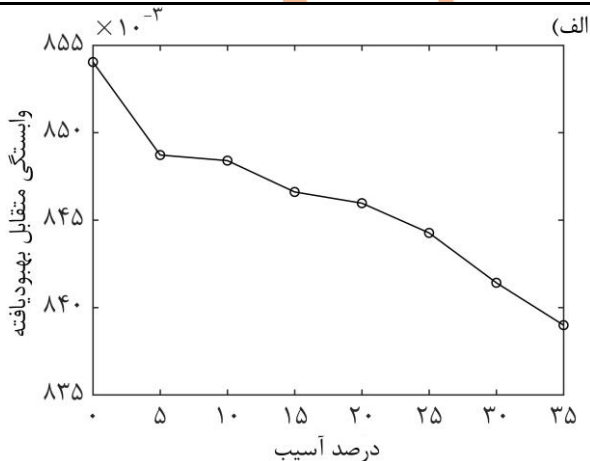
ویژگی بهبودیافته هزینه محاسباتی چندانی بر ویژگی اصلی اضافه نخواهد کرد و تنها گام اضافه شده کنترل همسایگی‌ها در گام‌های زمانی آینده می‌باشد. از طرفی، در محاسبه مقادیر ویژگی بهبودیافته پیچیدگی کم محاسباتی روش اصلی حفظ شده است. از سوی دیگر، ویژگی بهبودیافته، مزایایی نظیر امکان کنترل حساسیت به آسیب و بهبود عملکرد را بر ویژگی اصلی می‌افزاید که سبب افزایش کاربردها و رفع محدودیت‌های ویژگی اصلی می‌شود.

جدول ۴: مقایسه عملکرد ویژگی بهبودیافته با $\delta = 2 \times 10^{-6}$ نسبت به ویژگی

بهبودیافته در محاسبه شاخص نسبت درصد آسیب به مقادیر ویژگی

Table ۴: Comparison of the performance of the improved feature with $\delta = 2 \times 10^{-6}$ versus the original feature in calculating the ratio damage percentage over feature values

Damage Percent (Dp)	Damage percent over improved feature values ($\frac{D_p}{Imp_{GID}}$)	The difference percentage of the improved feature values ($\frac{D_p}{Imp_{GID}}$) relative to the unimproved feature values ($\frac{D_p}{I_{GID}}$)
۰٪	-	-
۵٪	۵,۸۹	۱۷,۸۲
۱۰٪	۱۱,۷۹	۱۷,۸۷
۱۵٪	۱۷,۷۲	۱۸,۱۲
۲۰٪	۲۳,۶۴	۱۸,۲۱
۲۵٪	۲۹,۶۱	۱۸,۴۵
۳۰٪	۳۵,۶۵	۱۸,۸۵
۳۵٪	۴۱,۷۲	۱۹,۱۹



افزایش ضریب حساسیت به مقدار $\delta = 3 \times 10^{-6}$ در شکل (۵) - (ب)، همچنان نمودار سیر نزولی را دارا می‌باشد ولی در این حالت در بخش‌هایی از نمودار شاهد کاهش شیب نزولی مقادیر وابستگی و نزدیک شدن نمودار آن به نمودار با شیب ثابت می‌باشد. همچنین در این حالت با افزایش ضریب حساسیت، در کل، مقدار کاهش وابستگی کمتر می‌باشد. همچنین با افزایش ضریب حساسیت شاهد نزدیک شدن مقادیر وابستگی و شکل کلی نمودارها و مقادیر مربوط به ویژگی بهبودیافته در شکل (۶) می‌باشیم.

با وجود آن‌که نقاط مورد بررسی در سازه به یکدیگر نزدیک نمی‌باشند و همچنین بر خلاف تحقیقات پیشین آسیب مابین این نقاط واقع نشده است، اما با توجه به این امر که این نقاط در فاصله متفاوتی از آسیب قرار گرفته‌اند، تأثیر متفاوتی نیز از آسیب دریافت می‌کنند. مطابق نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که ویژگی بهبودیافته قابلیت اندازه‌گیری این تغییرات هرچند کوچک میان این دو نقطه را دارا می‌باشد. با توجه به نتایج شکل (۶)، با به کارگیری ویژگی بهبود نیافته میان این دو نقطه از سازه، با وجود افزایش میزان آسیب همواره شاهد مقدار وابستگی واحد ($I_{GID} = 1$) می‌باشیم که نشان از وابستگی کامل میان دو نقطه از سازه است. در واقع ویژگی بهبودیافته قابلیت اندازه‌گیری تغییرات کوچک ناشی از تفاوت تأثیرگذاری آسیب بر دو نقطه از سازه را دارا نمی‌باشد.

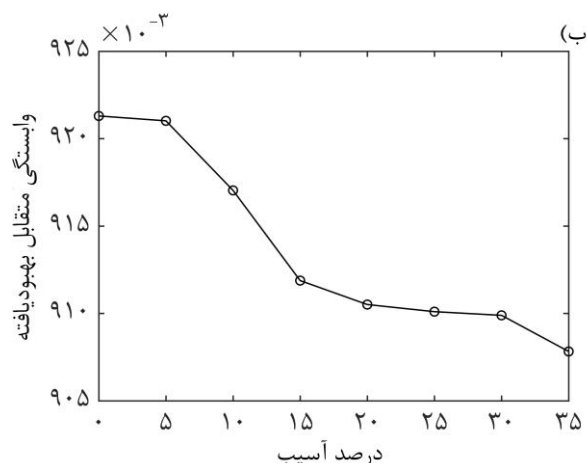
با توجه به مقادیر جدول (۴)، در محاسبه شاخص نسبت درصد آسیب به مقادیر ویژگی، ویژگی بهبودیافته، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. اختلاف مقادیر این شاخص، با افزایش درصد آسیب، نشان از کاهش بیشتر وابستگی میان جاذب‌های بدست آمده از نقاط سازه (Imp_{GID})، هنگام استفاده از ویژگی بهبودیافته می‌باشد. فارغ از میزان درصد آسیب، نتایج جدول (۴)، اختلاف حدود ۲۰ درصدی را میان مقادیر ویژگی بهبودیافته و ویژگی بهبود نیافته نشان می‌دهند. این موضوع نشان دهنده بهبود عملکرد ویژگی بهبودیافته در تمامی درصدهای آسیب می‌باشد. همچنین روند صعودی میزان اختلاف، بیان‌گر افزایش برتری ویژگی بهبودیافته با افزایش میزان آسیب است.

۰٪	۱۰,۷۶	-
۵٪	۱۰,۷۲	۱۷,۳۲
۱۰٪	۱۰,۷۱	۱۷,۲۸
۱۵٪	۱۰,۶۹	۱۷,۳۰
۲۰٪	۱۰,۶۷	۱۷,۱۳
۲۵٪	۱۰,۶۴	۱۷,۰۹
۳۰٪	۱۰,۶۱	۱۷,۱۷
۳۵٪	۱۰,۵۸	۱۷,۱۸

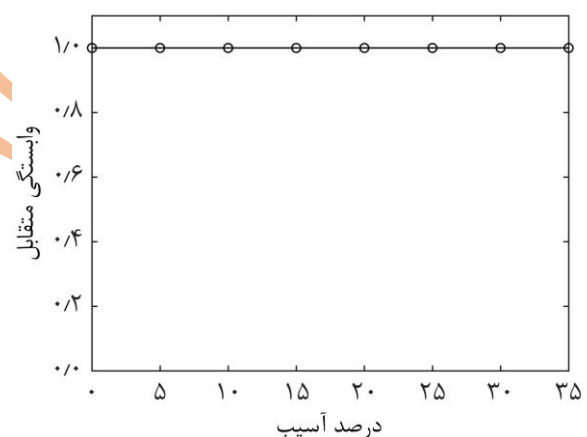
در جدول (۵) فرکانس‌های طبیعی مود اول سازه در درصدهای آسیب مختلف ارائه شده است. پس از نرمال‌سازی این فرکانس‌ها به وسیله فرکانس مود اول حالت آسیب ندیده ($1 \leq f_{n1} < \infty$) و مقایسه مقادیر ویژگی بهبودیافته ($\frac{D_p}{Imp_{GID}}$) با نسبت درصد آسیب به فرکانس مود اول نرمال شده ($\frac{D_p}{f_{n1}}$)، نتایج، برتری حدود ۱۸ درصدی ویژگی بهبودیافته در شناسایی آسیب در تمامی درصدهای آسیب نسبت به روش مقایسه تغییرات فرکانس اول سازه را نشان می‌دهند. در عین حال با توجه به این موضوع که روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای تحریک آشوبناک، بر خلاف روش‌های بر مبنای ویژگی‌های مودال، نیازمند مدلی از سازه برای استخراج ویژگی‌های مودال یا بکارگیری روش‌های تقریبی برای بدست آوردن آن‌ها نمی‌باشند، استفاده از روش بهبودیافته در این مورد، سهل‌الوصول‌تر نیز می‌نماید.

۴ - جمع‌بندی

با توجه به مطالب مطرح شده، استفاده از بهبودهای در نظر گرفته شده برای ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل می‌تواند سبب رفع محدودیت‌های این ویژگی و در عین حال حفظ مزایای مناسب آن شود. این محدودیت‌ها کاربرد این ویژگی را به مواردی که مکان آسیب از قبل مشخص می‌باشد محدود نموده بودند. به دلیل داشتن ویژگی‌هایی نظیر پیچیدگی محاسباتی نسبتاً کم، سرعت تشخیص بالا همچنین عدم نیاز به حسگرهای زیاد برای ثبت پاسخ سازه، در صورت این رفع این محدودیت‌ها، ویژگی وابستگی متقابل می‌تواند به گزینه‌ای مناسب جهت شناسایی آسیب در سازه‌ها بدل گردد. در تحقیق حاضر با در افزودن ضریب حساسیت و همچنین اعمال کنترل‌هایی در نحوه عملکرد این ویژگی، علاوه بر رفع محدودیت‌های فوق، حساسیت این ویژگی به آسیب افزایش یافته و همچنین قابلیت کنترل این حساسیت نیز فراهم گردیده است. در واقع موارد فوق با



شکل ۵: الف) عملکرد ویژگی وابستگی متقابل بهبودیافته (Imp_{GID}) در شناسایی آسیب با ضریب حساسیت $\delta = 2 \times 10^{-6}$ و ب) با ضریب حساسیت $\delta = 3 \times 10^{-6}$ در تیر یکسر گیردار آلومینیومی



شکل ۶: عملکرد ویژگی وابستگی متقابل بدون اعمال بهبودها در شناسایی آسیب در تیر یکسر گیردار آلومینیومی

جدول ۵: مقایسه عملکرد ویژگی بهبودیافته با $\delta = 2 \times 10^{-6}$ نسبت به تغییرات در فرکانس مود اول سازه در اثر آسیب

Table ۵: Comparison of the performance of the improved feature versus changes in the first mode frequency of the structure due to damage

Damage Percent (D_p)	Natural Frequency of the first Mode (f_1)	The difference percentage of the improved feature values ($\frac{D_p}{Imp_{GID}}$) relative to the percentage of damage to the normalized first mode frequency ($\frac{D_p}{f_{n1}}$)
--------------------------	---	---

Engineering, 37.2, pp. ۱۹-۲۸ [In Persian].
<https://doi.org/10.24260/j30.2020.50163,2711>

۷. Nikkhoo, A., Shemshaki, E. and Karegar, H., ۲۰۲۴. Reliability evaluation of stochastic subspace identification and frequency domain decomposition methods in estimating modal parameters of a structure excited by the earthquake. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 39, pp. ۱۱۱-۱۲۱ [In Persian].
<https://doi.org/10.24260/j30.2023.61746,3195>
۸. Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M. and Inman, D. J., ۲۰۲۱. A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, pp. ۰۷۷-۱۰۷.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077>
۹. Sun, X., Ilanko, S., Mochida, Y. and Tighe, R. C., ۲۰۲۳. A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures. *Vibration*, 7, pp. ۸۴۳-۸۷۵.
<http://dx.doi.org/10.3390/vibration7040051>
۱۰. Nichols, J., Trickey, S., Todd, M. and Virgin, L., ۲۰۰۳. Structural health monitoring through chaotic interrogation. *Meccanica*, 38, pp. ۲۳۹-۲۵۰.
<https://doi.org/10.1023/A:1022898403359>
۱۱. Nichols, J., Todd, M., Seaver, M. and Virgin, L., ۲۰۰۳. Use of chaotic excitation and attractor property analysis in structural health monitoring. *Physical Review E*, 67, ۰۱۶۲۰۹.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.67.016209>
۱۲. Nichols, J., Nichols, C., Todd, M., Seaver, M., Trickey, S. and Virgin, L., ۲۰۰۴. Use of data-driven phase space models in assessing the strength of a bolted connection in a composite beam. *Smart Materials and Structures*, 13, ۲۴۱.
<http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/001>
۱۳. Overbey, L. and Todd, M., ۲۰۰۸. Damage assessment using generalized state-space correlation features. *Structural Health Monitoring*, 7, pp. ۳۴۷-۳۶۳.
<http://dx.doi.org/10.1177/14759217.08.09.0678>
۱۴. Torkamani, S., Butcher, E. A., Todd, M. D. and Park, G., ۲۰۱۰. Damage assessment using hyperchaotic excitation and state-space geometry changes. *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, pp. ۵۹۹-۶۰۸.
<https://doi.org/10.1115/SMASIS2010-3705>

رفع نقایص در عملکرد این ویژگی که برخی از آن‌ها هنگام استفاده از آن برای شناسایی آسیب ظاهر می‌شوند، عملکرد بهبودیافته آن را تضمین می‌نمایند. با در نظر گرفتن موارد فوق، نتایج، بهبود حدود ۲۰ درصدی عملکرد ویژگی بهبودیافته را نسبت به ویژگی اولیه، در مسأله شناسایی آسیب در تیر یکسر گیردار آلومینیومی را نشان می‌دهند. همچنین نتایج بهبود حدود ۱۸ درصدی عملکرد روش بهبودیافته، در مقایسه با روش مقایسه تغییر فرکانسی مود اول را نیز تایید می‌نمایند.

منابع

۱. Fan, W. and Qiao, P., ۲۰۱۱. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 10, pp. ۸۳-۱۱۱.
<http://dx.doi.org/10.1177/1475921710365419>
۲. Doebling, S. W., Farrar, C. R. and Prime, M. B., ۱۹۹۸. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and Vibration Digest*, 30, pp. ۹۱-۱۰۵.
<http://dx.doi.org/10.1177/088310249803000201>
۳. Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R. and Czarnecki, J. J., ۲۰۰۳. A review of structural health monitoring literature: ۱۹۹۶-۲۰۰۱. *Los Alamos National Laboratory, USA*, 1, pp. ۱۶.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/977152>
۴. Das, S., Saha, P. and Patro, S., ۲۰۱۶. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, pp. ۴۷۷-۵۰۷.
<https://doi.org/10.1007/s13349-016-0168-5>
۵. Nikkhoo, A., Karegar, H., Mohammadi, R. K. and Hejazi, F., ۲۰۲۰. Improving the performance of the autoregressive method in modal identification of output-only systems using the empirical mode decomposition. *Structures*, pp. ۱۱۶۵-۱۱۷۳. Elsevier.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.006>
۶. Nikkhoo, A., Karegar, H. and Karami Mohammadi, R., ۲۰۲۱. Improving the performances of the autoregressive method in modal identification of output-only systems using Hilbert vibration decomposition method. *Sharif Journal of Civil*

- ۲۵ . Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. and Vastano, J. A., ۱۹۸۵. Determining lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16, pp. ۲۸۵-۳۱۷. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90011-9)
- ۲۶ . Pecora, L. M. and Carroll, T. L., ۱۹۹۶. Discontinuous and nondifferentiable functions and dimension increase induced by filtering chaotic data. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 6, pp. ۴۳۲-۴۳۹. <https://doi.org/10.1063/1.166186>
- ۱۵ . Torkamani, S., Butcher, E., Todd, M. and Park, G., ۲۰۱۱. Detection of system changes due to damage using a tuned hyperchaotic probe. *Smart Materials and Structures*, 20, ۰۲۰۰۰۶. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/20/2/020006>
- ۱۶ . Torkamani, S., Butcher, E. A. and Todd, M. D., ۲۰۱۶. A real-time approach for damage identification using hyperchaotic probe and stochastic estimation. *Meccanica*, 51, pp. ۵۳۷-۵۵۰. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0111-3>
- ۱۷ . Sloboda, A. R. and Kong, C. T. ۲۰۲۲., Boundary transformation vectors: a geometric method of quantifying attractor deformation for structural health monitoring. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 17, ۱۲۱۰۰۴. <https://doi.org/10.1115/1.5000791>
- ۱۸ . Takens, T., ۱۹۸۱. Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Math.*, 898, pp. ۳۲۶-۳۸۱. <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0091924>
- ۱۹ . Kostelich, E. J. and Schreiber, T., ۱۹۹۳. Noise reduction in chaotic time-series data: a survey of common methods. *Physical Review E*, 48, ۱۷۵۲. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.48.1702>
- ۲۰ . Fraser, A. M. and Swinney, H. L., ۱۹۸۶. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A*, 33, ۱۱۳۴. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.33.1134>
- ۲۱ . Todd, M., Nichols, J., Olson, C. and Overbey, L., ۲۰۰۵. Detecting generalized dynamic inter-relationship in a frame experiment with measures of information flow and interdependence. *Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems IV*, pp. ۲۶۴-۲۷۳. SPIE. <https://doi.org/10.1117/1.4709217.0.9.0678>
- ۲۲ . Arnhold, J., Grassberger, P., Lehnertz, K. and Elger, C. E., ۱۹۹۹. A robust method for detecting interdependences: application to intracranially recorded EEG. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 134, pp. ۴۱۹-۴۳۰. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(99\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(99)00140-2)
- ۲۳ . Theiler, J., ۱۹۸۶. Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data. *Physical Review A*, 34, ۲۴۲۷. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.34.2427>
- ۲۴ . Meirovitch, L., ۱۹۹۷. *Principles and techniques of vibrations*. (No Title).