



Research Article

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

Alireza Bahrami and Saeid Asil Gharebaghi\*

Faculty of Civil Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* corresponding author: ([asil@kntu.ac.ir](mailto:asil@kntu.ac.ir))

### Article Info

#### Article history:

Received: 10 November 2024

Revised: 4 January 2025

Accepted: 29 January 2025

#### Keywords:

Damage detection, generalized interdependence, chaotic attractor, chaotic excitation.

### 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 20% 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.

**Funding:** This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

### To Cite this article:

Bahrami, A.R. and Asil Gharebaghi, S. 2026. Damage detection in structures using chaotic excitation and improved generalized interdependence feature, Sharif Civil Engineering Journal, 41(4), 31-42.  
<https://doi.org/10.24200/ij30.2025.65638.3385>



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

علیرضا بهرامی و سعید اصیل قره‌باغی\*

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

\*نویسنده مسئول (asil@kntu.ac.ir)

### چکیده

روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی تحریک آشوبناک، شامل استخراج برخی ویژگی‌ها می‌شوند که با استفاده از آن‌ها بتوان تغییرات ناشی از آسیب بر سازه را اندازه‌گیری کرد؛ که از میان آن‌ها می‌توان به ویژگی وابستگی متقابل تعمیم‌یافته اشاره کرد، که حساسیت مناسبی به آسیب، پیچیدگی محاسباتی پایین، و حساسیت نسبتاً کم به عوامل محیطی دارد. اما ویژگی مذکور محدودیت‌هایی دارد که کاربرد آن را منحصر به موارد خاص می‌کند. در پژوهش حاضر، با افزودن ضریب حساسیت به آسیب و اعمال کنترل‌هایی در نحوه‌ی عملکرد ویژگی وابستگی متقابل تعمیم‌یافته، ضمن رفع محدودیت‌های ذکر شده، از خواص مطلوب آن در شناسایی آسیب استفاده شده است. در سازه‌ی 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 کرده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

### واژگان کلیدی:

شناسایی آسیب،  
وابستگی متقابل تعمیم‌یافته،  
جاذب آشوبناک،  
تحریک آشوبناک.

### ۱. مقدمه

یکی از متداول‌ترین روش‌های شناسایی آسیب در سازه، روش شناسایی آسیب بر پایه‌ی ارتعاش است. رویکرد شناسایی آسیب نشان می‌دهد که آسیب باعث ایجاد تغییراتی در مشخصات فیزیکی، مانند: جرم، میرایی، و سختی می‌شود؛ که منجر به تغییرات قابل تشخیص در پارامترهای مودال<sup>۱</sup> می‌شود، و می‌توان آن‌ها را با مقایسه‌ی قبل و بعد از ایجاد آسیب در سازه محاسبه کرد.<sup>۱۱</sup> محبوبیت پارامترهای مودال به این دلیل است که مشخصات مودال (مانند فرکانس طبیعی، میرایی مودال، شکل‌های مودی، و...) هر یک معنای فیزیکی مشخص به خود را دارند. لذا، مشخصات مودال نسبت به ویژگی‌های ریاضیاتی انتزاعی، که از روش‌های بر پایه‌ی مقیاس زمانی یا فرکانسی استخراج می‌شوند، سهولت بیشتری برای تفسیر و بررسی دارند.<sup>۱۱</sup>

در چهار دهه‌ی گذشته، پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی ارتعاش<sup>۲</sup> انجام شده است و به نظر می‌رسد که آن‌ها ادامه خواهند یافت؛ زیرا هیچ‌کدام از روش‌های موجود، قادر به حل تمامی مسائل شناسایی آسیب با انواع مختلف آسیب‌ها و سازه‌ها نیستند. دوبلینگ<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۸)،<sup>۱۲</sup> یک گردآوری جامع از روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی تغییرات در مشخصات مودال که تا سال ۱۹۹۸ ارائه شده بودند، تهیه کردند و دریافتند که بیشتر معایب روش‌های مذکور 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 پژوهش و بحث میان پژوهشگران در این زمینه هستند. سون<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۳)،<sup>۱۳</sup> نسخه‌ی بروزشده‌ای از گردآوری روش‌های بر پایه‌ی ارتعاش، که تا سال ۲۰۰۱ ارائه شده بودند، را منتشر کرده‌اند؛ که در آن‌ها، دسته‌بندی روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ویژگی‌های استخراج شده برای تشخیص آسیب انجام شده است.

فن<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۱)،<sup>۱۴</sup> یک گردآوری جامع از روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای پارامتر مودال برای سازه‌های تیر یا ورق مانند ارائه کرده‌اند؛ که با تأکید بر الگوریتم‌های شناسایی آسیب مربوط به پردازش سیگنال ارائه شده است. در پژوهش اخیر، روش‌های شناسایی آسیب، براساس ویژگی‌های ارتعاشی در چهار دسته‌ی اصلی طبقه‌بندی شده‌اند: (۱) بر مبنای فرکانس طبیعی، (۲) بر مبنای شکل مودی، (۳) بر مبنای انحنای شکل مود؛ و (۴) روش‌هایی که همزمان از شکل‌های مودی و فرکانس‌ها استفاده می‌کنند. همچنین برای نشان دادن مزایا و معایب هر یک از چهار روش اخیر، یک بررسی مقایسه‌ای با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود<sup>۶</sup> در شرایط مختلف انجام داده‌اند.

داس و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>۱۴</sup> به جمع‌آوری روش‌های شناسایی آسیب بر پایه‌ی ارتعاش و مقایسه‌ی آن‌ها پرداخته و نشان داده‌اند که در میان تمامی روش‌های بررسی‌شده‌ی شناسایی آسیب، تجمیع مدل خودهمبسته‌ی میانگین-متحرک

<sup>4</sup> Sohn

<sup>5</sup> Fan

<sup>6</sup> Finite Element

<sup>1</sup> Modal Parameters

<sup>2</sup> Vibration-based

<sup>3</sup> Doebling



مودال و روش‌های بر مبنای انعطاف‌پذیری مودال و ... بوده است و مزایا و معایب هر یک از روش‌های اخیر را به تفصیل بیان کرده‌اند.

با توجه به خواص سیستم‌های آشوبناک، نظیر حساسیت زیاد به تغییرات کوچک، ایده‌ی استفاده از تحریک آشوبناک و ویژگی‌های حساس به آسیبی که از خواص فضای حالت آشوبناک استفاده می‌کند، به منظور شناسایی آسیب توسط پژوهشگران بسیاری بررسی شده است. نیکولز و همکاران (۲۰۰۳)<sup>[۱۰]</sup> به بررسی امکان استفاده از نظریه‌ی آشوب و خواص آن در روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ارتعاش پرداخته و یک ویژگی بر مبنای جاذب آشوبناک را، که از مباحث تحلیل غیرخطی سری‌های زمانی به‌دست آمده بود، ارائه کرده‌اند. ایشان سازه را با استفاده از خروجی یک نوسانگر آشوبناک تحریک کرده و به این ترتیب یک ورودی آشوبناک معین (با بُعد پایین) به وجود آورده‌اند. ایده‌ی اصلی پژوهش ایشان آن بود که تغییرات ناشی از آسیب، توسط ویژگی حساس به آسیبی با عنوان میانگین نسبت واریانس جاذب محلی (ALAVR)<sup>۷</sup>، کمی‌سازی شوند. لذا، روش بر مبنای آشوب با دو روش تغییرات در فرکانس و شکل مود تحت تغییرات محیطی مقایسه شده و نتایج نشان داده‌اند 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 ویژگی‌های بر پایه‌ی فضای حالت به‌دلیل عدم وابستگی به مدل و خطی بودن یا نبودن و یا دیگر محدودیت‌های مختص به مسئله، موارد استفاده‌ی بیشتری از دیگر روش‌ها دارند.

نیکولز و برخی دیگر از همکارانش (۲۰۰۳)<sup>[۱۱]</sup> نیز در مطالعه‌ی دیگری از یک نمونه‌ی آزمایشگاهی تیر یکسر گیردار آلومینیومی و از اطلاعات یکی از متغیرهای معادلات لورنز<sup>۸</sup> به‌عنوان تحریک آشوبناک استفاده کرده‌اند. ویژگی حساس به آسیب در پژوهش ایشان، خطای پیش‌بینی متقابل غیرخطی<sup>۹</sup> در نظر گرفته شده است؛ که روش کارش آن بوده است که با استفاده از اطلاعات حالت آسیب‌ندیده، مقادیر اطلاعات را برای تعداد مشخصی گام در آینده پیش‌بینی کند. هر چه آسیب در سازه بیشتر شود، خطای پیش‌بینی مذکور بیشتر خواهد شد. نتایج پژوهش اخیر، خطای پیش‌بینی متقابل غیرخطی را به‌دلیل تفکیک سریع بین مجموعه‌ی اطلاعات حالت‌های آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده، ویژگی مناسبی برای تشخیص آسیب در سازه معرفی کرده است. همچنین امکان دسته‌بندی اندازه‌ی آسیب، مخصوصاً در مقیاس‌های زمانی سریع‌تر نیز با روش مذکور فراهم شده است. ایشان در پژوهش دیگری (۲۰۰۴)<sup>[۱۲]</sup> بر روی تیرهای کامپوزیت، به جای استفاده از اطلاعات یک یا چند نقطه از سازه و مقایسه‌ی آن‌ها در زمان‌های مختلف، اطلاعات دو نقطه را در طرفین محل آسیب در یک زمان مقایسه کرده‌اند. اساس کار بر آن بوده است که آسیب ارتباط دو نقطه‌ی موردنظر و جاذب‌های به‌دست‌آمده از اطلاعات، آن‌ها را مخدوش می‌سازد. ایشان از ویژگی خطای پیش‌بینی متقابل غیرخطی برای یافتن ارتباط بین دو جاذب استفاده کرده و نشان داده‌اند که با استفاده از مدل پیش‌بینی متقابل غیرخطی (پیش‌بینی مرتبه‌ی صفر) می‌توان بررسی کرد که آیا یک ارتباط پیوسته بین دو جاذب به‌دست‌آمده از اطلاعات دو نقطه در طرفین آسیب برقرار است یا خیر.

(ARMA)<sup>۱</sup> با مدل سری زمانی می‌تواند در تشخیص آسیب مؤثر عمل کند. با استفاده از روش ذکرشده، حتی تغییرات کوچک هم، بدون آنکه پارامترهای محیطی اختلالی در آن ایجاد کنند، قابل شناسایی خواهند بود. مدل شکل مودی، روشی مؤثر برای شناسایی آسیب است، ولی تأثیر المان‌های محیطی، مانند باد و یا ارتعاش‌های محیطی می‌تواند مشکلاتی را در تشخیص دقیق ایجاد کنند.

نیکخو و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۵]</sup> به بهبود عملکرد روش خودهمبسته برای شناسایی مودهای دینامیکی سیستم‌های خروجی محور پرداخته و برای غلبه بر محدودیت‌های روش خود همبسته، از تجزیه‌ی مود تجربی (EMD)<sup>۲</sup> استفاده کرده‌اند. روش ارائه‌شده، امکان استخراج پارامترهای مودال، شامل فرکانس‌ها و نسبت‌های میرایی را از پاسخ‌های ایستا و غیرایستا، فقط با استفاده از یک حسگر فراهم می‌کند. همچنین نتایج مطالعات عددی ارائه‌شده، دقت بالای روش بهبودیافته در شناسایی پارامترهای مودال سیستم‌های مختلف را تأیید کرده است. همچنین ایشان در پژوهشی مشابه (۲۰۲۱)<sup>[۶]</sup> به بهبود عملکرد روش خودهمبسته در سیستم‌های خروجی محور با استفاده از روش تجزیه‌ی ارتعاش‌های هیلبرت پرداخته‌اند، که می‌تواند پارامترهای کلیدی مانند فرکانس و نسبت میرایی را با دقت بالا استخراج کند. نتایج نشان داده است که روش مذکور در مقایسه با سایر شیوه‌های موجود، عملکرد قابل‌توجهی به‌خصوص در شرایط چالش‌برانگیز دارد.

نیکخو و برخی دیگر از همکارانش (۲۰۲۴)<sup>[۷]</sup> مطالعه‌ی دیگری نیز مبنی بر بررسی قابلیت اطمینان روش‌های شناسایی زیرفضای تصادفی و تجزیه‌ی حوزه‌ی فرکانسی در تخمین پارامترهای مودال برای سازه‌های تحت نیروی زلزله انجام داده و دریافته‌اند که نتایج به‌دست‌آمده از روش شناسایی زیرفضای تصادفی نسبت به روش تجزیه‌ی حوزه‌ی فرکانسی، دقت بالاتری دارد. همچنین در هر دو روش با افزایش شماره‌ی مودها، دامنه‌ی خطا در فرکانس و میرایی کاهش یافته است.

اوجی و همکاران (۲۰۲۱)<sup>[۸]</sup> کاربردهای یادگیری ماشین<sup>۴</sup> و یادگیری عمیق در شناسایی آسیب را در سازه‌های عمرانی بررسی و بیان کرده‌اند 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 عملاً روش‌های مذکور هنوز می‌توانند بسته به مورد، رفتار متفاوتی را نشان دهند؛ چرا که نمی‌توان مجموعه‌ای از دسته‌بندی‌کننده‌های ویژگی‌ها را یافت که برای هر نوع سازه‌ی عمرانی و در تمامی شرایط آسیب عملکرد مناسبی را داشته باشند. همچنین برای مرحله‌ی آموزش، روش‌های اخیر نیازمند اطلاعات ارتعاشی از سازه‌های آسیب‌ندیده و آسیب‌دیده در شرایط آسیب متفاوت هستند، که برای سازه‌های عمرانی به‌ندرت در دسترس هستند.

سان و همکاران (۲۰۲۳)<sup>[۹]</sup> در تازه‌ترین گردآوری از روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ارتعاش، به بررسی و مقایسه‌ی روش‌های ذکرشده در سازه‌هایی، نظیر: تیرها، خرپاها، قاب‌ها، و ورق‌ها پرداخته و تمرکزشان بر روی روش‌های بر مبنای فرکانس طبیعی، شکل مودی، انحنای مودال، انرژی کرنشی

<sup>6</sup> Chaotic Attractor

<sup>7</sup> Average Local Attractor Variance Ratio

<sup>8</sup> Lorenz Equations

<sup>9</sup> Nonlinear Cross Prediction Error

<sup>1</sup> Auto Regressive Moving-Average

<sup>2</sup> Empirical Mode Decomposition

<sup>3</sup> Avci

<sup>4</sup> Machine Learning

<sup>5</sup> Sun

آسیب وارد شده به سازه به کمک ویژگی حساس به آسیب، از تحلیل فضاهای ذکرشده‌ی حالت بازسازی شده تشخیص داده خواهد شد. در ادامه، مبنای هر یک از مراحل اخیر مشخصاً برای روش شناسایی آسیب ارائه شده در پژوهش حاضر بیان شده‌اند.

## ۱.۲. تنظیم تحریک آشوبناک به منظور اعمال به سازه

در روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای ارتعاش، معمولاً تحریک به صورت سیگنال‌های تصادفی پهن‌بند<sup>۱۵</sup> در نظر گرفته می‌شود. طبیعت پهن‌بند تحریک‌های صورت‌گرفته، پاسخ مودال کامل را تضمین می‌کند، که برای رویکردهای فرکانسی به منظور شناسایی سیستم یا استخراج ویژگی ایده‌آل است. از طرفی دیگر، سیگنال‌های آشوبناک نیز عمدتاً طیف فرکانسی پهن‌بند دارند، ولی برخلاف سیگنال‌های تصادفی، معین<sup>۱۶</sup> هستند. این بدان معناست که برخلاف مواردی مانند نوفه سفید، که از یک فرایند کاملاً تصادفی نشأت می‌گیرد، به منظور تشکیل سیگنال‌های آشوبناک نیاز به معادله‌های غیرخطی مشخصی است و رفتار آن‌ها دست‌کم در کوتاه‌مدت قابل‌پیش‌بینی است. همچنین در نوفه سفید، هیچ الگوی مشخصی وجود ندارد؛ ولی معادله‌های حاکم بر سیستم‌های آشوبناک، الگوهای مشخص و چرخه‌های غیردوره‌ای را دنبال می‌کنند. این ویژگی به همراه طبیعت فرکتالی<sup>۱۷</sup> جاذب‌های آشوبناک باعث ایجاد یک توزیع با بُعد پایین میان خطوط مسیر در فضای حالت خواهد شد، که امکان طبقه‌بندی بر مبنای جاذب را فراهم می‌سازد.<sup>۱۱</sup> علاوه بر آن، سیستم‌های آشوبناک به دلیل داشتن نمای لیاپانوف مثبت، حساسیت بالایی به تغییرات کوچک دارند. از طرفی، کوچک‌بودن تغییرات ناشی از آسیب در سازه، بیش از پیش آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب جهت تحریک سازه بدل خواهد کرد.

هر تحریک آشوبناکی که به سازه اعمال شود، نماهای لیاپانوف مشخصی دارد. سازه نیز به عنوان یک فیلتر برای تحریک اخیر، نماهای لیاپانوف مختص به خود را دارد. هرگونه تغییر در مشخصات سازه، نظیر جرم، سختی و...، نماهای لیاپانوف را دستخوش تغییر خواهد کرد.<sup>۱۱</sup> روابط ۱ و ۲، به ترتیب نمایانگر نماهای لیاپانوف تحریک و سازه هستند؛ که در آن‌ها،  $d_e$  بُعد سیگنال تحریک و  $d_s$  بُعد فیلتر هستند.

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

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

برای ایجاد یک تحریک مناسب، دو ضابطه باید رعایت شوند: (۱) برای آنکه تغییرات سازه در پاسخ دینامیکی آن مشخص شوند، دست‌کم باید منفی‌ترین نمای لیاپانوف تحریک، کوچک‌تر از بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف سازه باشد (رابطه‌ی ۳). اگر  $\lambda_{d_e}^e$  کوچک‌تر و از نمای  $i$  ام سازه ( $\lambda_i^s$ ) نیز کمتر شود، آنگاه ضریب تشریحی مود  $i$  ام در دینامیک سازه افزایش خواهد یافت.<sup>۱۷</sup>

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

(۲) جاذب به دست‌آمده از سازه‌ی تحریک‌شده باید 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 ارائه

آوربی<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۰۸)<sup>۱۳</sup> به مقایسه‌ی دو ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل و خطای پیش‌بینی متقابل هم به صورت آزمایشگاهی با استفاده از قاب یک دهانه‌ی آلومینیومی و هم با استفاده از شبیه‌سازی یک سیستم ۵ درجه‌ی آزادی جرم و فنر با هدف اعتبارسنجی برای استفاده از ویژگی‌های بین جاذبی در روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای آشوب پرداخته‌اند.

ترکمنی و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۱)<sup>۱۴</sup> و <sup>۱۵</sup> برای اولین بار از سیگنال فرا آشوبناک برای تحریک سازه استفاده کرده و با استفاده از یک سیستم ۸ درجه‌ی آزادی و به‌کارگیری ویژگی حساس به آسیب میانگین نسبت واریانس جاذب محلی، مقایسه‌ای بین اعمال تحریک به صورت آشوبناک و فرا آشوبناک به سازه انجام داده و دریافته‌اند که استفاده از تحریک فرا آشوبناک، باعث ایجاد حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات کوچک آسیب در مقایسه با سیگنال آشوبناک می‌شود. همچنین ایشان (۲۰۱۶)<sup>۱۶</sup> یک روش بدون وقفه را برای شناسایی آسیب با استفاده از تخمین آماری منتشر و از فیلتر کالمن تعمیم‌یافته به دلیل توانایی بالای آن برای پیش‌بینی و تقریب، برای پایش بی‌وقفه‌ی تغییرات ناشی از آسیب در سازه استفاده کرده‌اند.

با استفاده از پژوهش‌های اخیر، اسلوبودا<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲)<sup>۱۷</sup> یک ویژگی حساس به آسیبی به نام بردارهای تغییرشکل مرزی (BTV)<sup>۱۲</sup> ارائه کرده‌اند. ایشان با استفاده از مدل‌سازی سیستم جرم و فنر ۸ درجه‌ی آزادی و همچنین یک تیر یکسر گیردار، کارایی ویژگی مذکور را در شناسایی آسیب نشان داده و روشی برای یافتن اندازه و مکان آسیب در سازه‌های خطی مدل‌سازی شده پیشنهاد کرده‌اند؛ که به دلیل استفاده از مقاطع پوانکره<sup>۱۳</sup> برای یافتن نمایی از فضای حالت دینامیک سیستم، حساسیت بالایی نسبت به آسیب نداشته و به علت کاربرد آن فقط در سیستم‌های خطی، موارد استفاده از روش مذکور را محدود ساخته است.

در پژوهش حاضر، با بهبود ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل تعمیم‌یافته، ضمن رفع محدودیت‌های ویژگی اخیر، 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 استفاده شده است. در ادامه و در بخش بعد، مبنای و نحوه‌ی عملکرد روش شناسایی آسیب ارائه و نیز ویژگی وابستگی متقابل بهبودیافته بیان شده است. سپس در انتها، به مقایسه و بررسی نتایج حاصل از اعمال روش مذکور به سازه‌ی تیر یکسر گیردار آلومینیومی پرداخته شده است.

## ۲. مبنای روش شناسایی آسیب

به منظور شناسایی آسیب در سازه‌ها به کمک تحریک آشوبناک، در گام نخست نیاز است که با توجه به مشخصات سازه‌ی مد نظر، یک تحریک آشوبناک معین با بُعد پایین تنظیم شود. استفاده از سیستم‌های آشوبناک با بُعد بالا در تحلیل‌های بر مبنای جاذب<sup>۱۴</sup> به دلیل ناتوانایی آن‌ها در پُر کردن جاذب باعث ایجاد نتایج ضعیف خواهد شد.<sup>۱۳</sup> پس از اعمال تحریک تنظیم‌شده 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

<sup>14</sup> Attractor-based

<sup>15</sup> Broadband

<sup>16</sup> Deterministic

<sup>17</sup> Fractal

<sup>10</sup> Overbey

<sup>11</sup> Sloboda

<sup>12</sup> Boundary Transformation Vectors

<sup>13</sup> Poincare Sections

تأخیریافته‌ای از خودش ترسیم می‌شود. دو متغیر اصلی، که باید برای به‌کارگیری روش اخیر مشخص شوند، بُعد تعبیه‌سازی ( $m$ ) و گام زمانی تأخیر ( $T$ ) هستند (رابطه‌ی ۷). به منظور اینکه فضای حالت بازسازی شده با روش مختصات تأخیریافته، دینامیک سیستم را به‌طور کیفی حفظ کند، ثبت سری زمانی با گام زمانی یکسان و مشخص کردن مقادیر مناسب برای  $m$  و  $T$  الزامی است. برای یافتن دو متغیر ذکرشده‌ی اسکالر، روش‌های زیادی ارائه شده‌اند، اما قابل‌استفاده‌ترین روش به‌منظور تخمین مقدار  $m$ ، روش همسایه‌های کاذب و برای مقدار  $T$ ، روش اطلاعات متقابل میانگین و تابع خودهمبستگی<sup>۲۲</sup> هستند.<sup>[۲۰]</sup> در پژوهش 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. ۳. ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل تعمیم‌یافته و بهبودهای اعمال شده بر آن

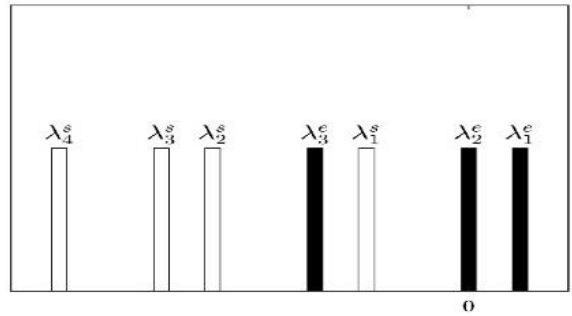
همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، روال عملکرد ویژگی ذکرشده به‌صورت مقایسه‌ی دو جاذب و یافتن وابستگی میان آن‌هاست. در واقع، اگر روش مختصات تأخیریافته، برای دو سری زمانی با بُعد تعبیه‌سازی  $m$  و پارامتر تأخیر  $T$  استفاده شود، حاصل بردارهای فضای حالتی به‌صورت  $\mathbf{X}_i = (x_i, x_{i+T}, \dots, x_{i+(m-1)T})$  و  $\mathbf{Y}_i = (y_i, y_{i+T}, \dots, y_{i+(m-1)T})$  خواهد بود. مجموعه‌ی بردارهای اخیر فضای حالت می‌توانند در قالب ماتریس‌هایی به‌صورت  $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_n)$  و  $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_n)$  نوشته شوند.<sup>[۲۱]</sup>

براساس الگوریتم ارائه‌شده توسط آرنهولد<sup>۲۳</sup> و همکاران (۱۹۹۹)،<sup>[۲۲]</sup> به‌منظور یافتن وابستگی میان دو جاذب با استفاده از ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل، ابتدا دو نقطه‌ی تصادفی دلخواه به‌عنوان مثال در زمان  $t$  بر روی جاذب‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس  $k$  نزدیک‌ترین همسایه به نقاط دلخواه  $X_t$  و  $Y_t$ ، به ترتیب با اندیس‌های زمانی  $P_{t,j}$  و  $Q_{t,j}$ ، بر روی جاذب‌ها مشخص می‌شود. این همسایگی‌ها با در نظر گرفتن فاصله‌ی اقلیدسی<sup>۲۴</sup> نقاط از نقطه‌ی دلخواه تشکیل می‌شوند و از آن‌ها نقطه‌ی که در مسیر حرکت جاذب قرار دارند، بنا بر اصلاح تیلر<sup>۲۵</sup> (۱۹۸۶)،<sup>[۲۳]</sup> خارج خواهند شد.<sup>[۲۲]</sup> پس از تشکیل نزدیک‌ترین همسایگی برای هر جاذب، با استفاده از اطلاعات آن‌ها، دو شاخص  $D_i(\mathbf{X}|\mathbf{Y})$  و  $D_i(\mathbf{X})$  مطابق روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند.

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

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

تفاوت دو شاخص اخیر فقط در محاسبه‌ی  $D_i(\mathbf{X}|\mathbf{Y})$  است، که در آن از اندیس‌های زمانی نزدیک‌ترین همسایگی ایجادشده در جاذب  $\mathbf{Y}$  به‌منظور محاسبه‌ی مجموع میانگین مربعات فواصل استفاده می‌شود. به بیانی دیگر، به‌جای استفاده از نزدیک‌ترین همسایگی تشکیل‌شده در جاذب  $\mathbf{X}$ ، از معادل‌های زمانی نزدیک‌ترین همسایگی در جاذب  $\mathbf{Y}$ ، و نقطه‌ی که با اندیس‌های زمانی ذکرشده بر روی جاذب  $\mathbf{X}$  ایجاد می‌شوند، استفاده می‌شود.



شکل ۱. برهم‌کنش نماهای لیاپانوف برای سیگنال فیلترشده با رعایت هر دو ضابطه برای تنظیم تحریک آشوبناک.

می‌کنند.<sup>[۱۱]</sup> در پژوهش حاضر، برای یافتن بُعد جاذب حاصل‌شده از پاسخ، از تقریب کاپلن-یورک<sup>۱۸</sup> استفاده شده است؛ که با استفاده از رابطه‌ی ۴، نماهای لیاپانوف یک سیستم را به بُعد آن مرتبط می‌کند، و در آن  $M$  تعداد نماهایی است که می‌توانند قبل از آنکه مجموع آن‌ها منفی شود، با هم جمع شوند.  $\lambda_n$  نماهای لیاپانوف و  $D_L$  بُعد لیاپانوف سیستم هستند.<sup>[۱۰]</sup>

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

اگر نمودار حاصل از ترکیب نماهای لیاپانوف تحریک و سازه با رعایت شرط اول به صورت شکل ۱ در نظر شود، با توجه به رابطه‌ی ۴، برای داشتن پاسخی با کمترین بُعد، لازم است رابطه‌ی ۵ برقرار باشد:<sup>[۱۱]</sup>

$$|\lambda_1^e| < |\lambda_1^s| \quad (5)$$

در این صورت با فرض اینکه تحریک از خروجی یک فرآیند پیوسته در زمان به‌دست آمده باشد (یک نمای لیاپانوف صفر داشته باشد)، کمترین بُعد ممکن به‌صورت رابطه‌ی ۶ باشد:<sup>[۱۷]</sup>

$$D = 2 + \frac{\lambda_1^e}{|\lambda_1^s|} \quad (6)$$

در این صورت، اگر  $\lambda_1^e$  از  $|\lambda_1^s|$  بزرگ‌تر شود، بُعد جاذب افزایش خواهد یافت و در نتیجه جاذب پیچیده‌تری از پاسخ سازه به‌دست می‌آید؛ که این موضوع تحلیل جاذب را دشوارتر خواهد ساخت. اما به‌منظور تحلیل جاذب، ابتدا باید روش‌های استفاده‌شده برای تشکیل آن‌ها از سری‌های زمانی پاسخ شرح داده شود؛ که در بخش بعد، به توضیح آن‌ها و نحوه‌ی عملکردشان به‌طور کامل پرداخته شده است.

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

دو روش اصلی به‌منظور بازسازی کیفی جاذب آشوبناک، با استفاده از اطلاعات سری زمانی، روش مختصات تأخیریافته<sup>۱۹</sup>، و تحلیل طیف منفرد<sup>۲۰</sup> هستند.<sup>[۱۰]</sup> در پژوهش حاضر، به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی کمتر و دقت بالاتر از روش مختصات تأخیریافته به‌منظور بازسازی جاذب آشوبناک استفاده شده است؛ که در واقع حالت تعمیم‌یافته‌ی از نظریه‌ی تعبیه‌سازی تاکینز<sup>۲۱</sup> است.<sup>[۱۸] و [۱۹]</sup> در روش مختصات تأخیریافته، اطلاعات سری زمانی در مقابل، نسخه‌ی

22 Autocorrelation Function

23 Arnhold

24 Euclidean Distance

25 Theiler

18 Kaplan-Yorke Conjecture

19 Delayed Coordinates

20 Singular Spectrum Analysis

21 Takens Embedding Theorem

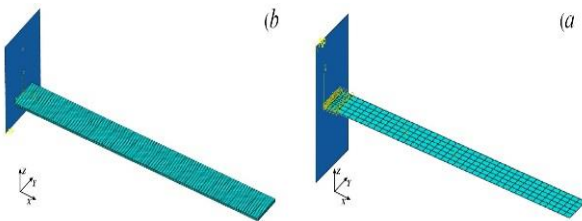
ایجاد شده در همسایگی‌های ذکر شده، به‌عنوان تخمین اولیه از ضریب  $\delta$  استفاده کرد. به‌طور کلی، ضریب  $\delta$  مابین بیشینه‌ی مطلق و میانگین بیشینه‌ی فواصل در همسایگی‌های تشکیل شده است. بدیهی است هر چه تعداد همسایگی‌های مذکور بیشتر باشد، تخمین دقیق‌تر خواهد بود.

مورد دوم، کنترل نزدیک‌ماندن نقاط در نزدیک‌ترین همسایگی تشکیل شده است. به این صورت که با جلوگیری از جلودردن نقاط داخل همسایگی در چند گام زمانی آینده در مسیر حرکت جاذب، بررسی می‌شود که آیا همسایگی انتخاب شده در فاصله‌ی مشخص از یکدیگر باقی خواهند ماند یا خیر و نقاطی که در فاصله‌ی مشخص باقی نمانده‌اند، از همسایگی خارج خواهند شد؛ در این صورت نقاطی که به دلایلی مانند کم‌بودن بُعد تعبیه‌سازی ( $m$ ) یا مسیر حرکت خاص جاذب در همسایگی یکدیگر قرار گرفته‌اند و اصطلاحاً همسایه‌ی کاذب هستند، در هیچ‌یک از همسایگی‌های انتخاب شده قرار نخواهند گرفت.

کاربرد توأمان دو مورد ذکر شده تضمین می‌کند 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 ویژگی مذکور، محدودیت‌هایی نظیر اجبار به انتخاب دو نقطه برای مقایسه، که دقیقاً در اطراف آسیب باشند، برطرف خواهد شد و با انتخاب دو نقطه‌ی دلخواه از سازه و مقایسه‌ی وابستگی آن‌ها، می‌توان وجود آسیب در سازه را تشخیص داد. به‌عنوان نمونه، در پژوهش حاضر، آسیب در تیر یکسر گیردار آلومینیومی به کمک ویژگی بهبود یافته با استفاده از جاذب‌های به‌دست آمده از پاسخ دو نقطه از ابتدا و انتهای تیر تشخیص داده شده است.

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

سازه‌ی در نظر گرفته شده، یک تیر یکسر گیردار آلومینیومی مطابق شکل ۲ است، که با استفاده از روش اجزاء محدود مدل‌سازی شده است، و  $0/5$  متر طول،  $0/05$  متر عرض، و  $3/175 \times 10^{-3}$  متر ضخامت دارد. آسیب در سازه‌ی اخیر به‌صورت جداسازی تیر از محل تکیه‌گاه گیردار مدل‌سازی شده است. همچنین درصد آسیب به‌صورت 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 بوده است. مشخصات مصالح آلومینیومی شامل مدول یانگ  $E = 73 \text{ GPa}$ ، جرم حجمی  $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ ، و نسبت پواسون  $\nu = 0/33$  است.



شکل ۲. تیر یکسر گیردار آلومینیومی مدل‌سازی شده: (a) در حالت دو بُعدی، (b) در حالت سه بُعدی.

سپس یک شاخص دیگر، که فاصله‌ی نقطه‌ی دلخواه منتخب را از مجموعه‌ی  $n$  نقطه‌ی تصادفی بر روی همان جاذب را تخمین می‌زند، مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود (معمولاً  $r \gg k$ ) انتخاب می‌شود، که از خطاهای آماری جلوگیری شود.

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

با استفاده از سه شاخص ذکر شده و محاسبه‌ی آن‌ها برای  $n$  نقطه‌ی دلخواه، ویژگی وابستگی متقابل تعمیم یافته به صورت رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود: <sup>[۲۱]</sup>

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

بنابر تعریف ویژگی وابستگی متقابل تعمیم یافته، در محدوده‌ی نويز قابل قبول،  $0 < I_{GID} < 1$  است.  $I_{GID} \approx 0$  بیانگر عدم وابستگی میان جاذب  $\mathbf{X}$  و  $\mathbf{Y}$ ، و  $I_{GID} = 1$  نشانگر رابطه‌ی کاملاً درگیر <sup>[۲۶]</sup> هستند.

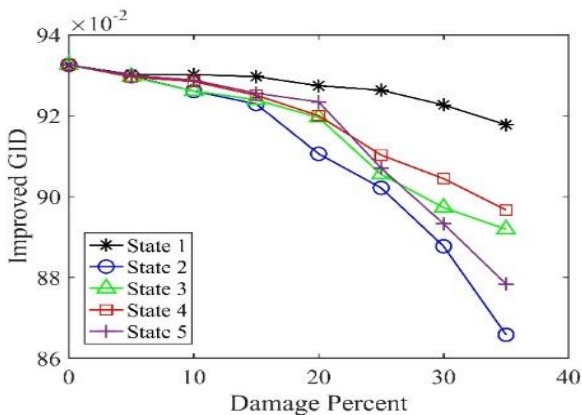
در پژوهش‌های انجام گرفته، از یک ویژگی زمانی استفاده شده است، که مکان آسیب در سازه مشخص باشد و به کمک آن، وابستگی جاذب‌های نقاط قبل و بعد از محل آسیب مقایسه شود؛ که از میان آن‌ها می‌توان به برخی نوشتارها، <sup>[۲۱]</sup> اشاره کرد، که در آن‌ها به کمک ویژگی زمانی ذکر شده به شناسایی آسیب در محل اتصال‌های 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 نیست. به‌عنوان مثال، بررسی جاذب‌های قبل و بعد از محل جداسازی تیر یکسر گیردار از محل تکیه‌گاه ممکن نیست. همین امر، استفاده از ویژگی مذکور را با وجود داشتن مزایایی نظیر پیچیدگی ریاضیاتی و هزینه‌ی محاسباتی نسبتاً کم و همچنین نیاز به تعداد حسگرهای پایین، محدود به موارد خاص می‌سازد. لذا در پژوهش حاضر، با اعمال بهبودهایی بر روند عملکردی ویژگی زمانی ضمن حفظ مزایای آن، این محدودیت‌ها تا حدود زیادی از میان برداشته شده‌اند.

بهبودهای اعمال شده بر ویژگی زمانی اخیر شامل دو مورد است: مورد اول، تعبیه کردن عددی کوچک با عنوان ضریب حساسیت به آسیب ( $\delta$ ) که به وسیله‌ی آن می‌توان حساسیت ویژگی به تغییرات در جاذب‌ها را کنترل کرد. هر چه ضریب حساسیت، عدد بزرگ‌تری باشد، حساسیت ویژگی به تغییرات در جاذب‌ها کمتر خواهد بود. بدیهی است در صورت انتخاب  $\delta$  بسیار بزرگ، عملکرد ویژگی بهبود یافته به سمت ویژگی وابستگی متقابل معمولی میل خواهد کرد. در واقع، ضریب  $\delta$  به‌صورت بیشینه‌ی فاصله‌ی قابل قبول در هنگام تشکیل نزدیک‌ترین همسایگی‌ها ( $D_i(\mathbf{X})$ ) ظاهر می‌شود و برخلاف ویژگی اصلی، که تعداد را ملاک تشکیل نزدیک‌ترین همسایگی قرار می‌دهد، در ویژگی بهبود یافته، ضریب  $\delta$ ، کنترل‌کننده‌ی نقاطی است که در همسایگی‌ها قرار خواهند گرفت. رعایت این مورد سبب می‌شود تأثیر شکل جاذب و تعداد نقاط استفاده شده در تشکیل آن بر همسایگی‌های تشکیل شده به‌طور محسوسی کاهش یابد و فقط نقاطی در همسایگی‌ها قرار گیرند که واقعاً به یکدیگر نزدیک باشند.

به‌منظور تعیین ضریب  $\delta$ ، پس از تشکیل چند همسایگی در قسمت‌های مختلفی از جاذب  $\mathbf{X}$  (با تعداد نقاط مشخص)، می‌توان از بیشینه‌ی فواصل

جدول ۱. حالت‌های مختلف آسیب در نظر گرفته شده در مدل سه‌بُعدی.

Damage Scenarios	Method of separating nodes in the cross-section of the beam at the support location
State 1	
State 2	
State 3	
State 4	
State 5	



شکل ۳. تفاوت مقادیر ویژگی وابستگی متقابل بهبود یافته با ضریب

حساسیت  $\delta = 5 \times 10^{-6}$  برای حالت‌های مختلف آسیب از صفر تا ۳۵ درصد آسیب.

نماهای لیاپانوف تحریک آشوبناک از یک ضریب ( $\mathcal{E}$ ) در معادله‌های دافینگ استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \mathcal{E}\dot{x}_2 &= -ax_2 + b(x_1 - x_1^3) + c \sin(x_3) \\ \mathcal{E}\dot{x}_3 &= \omega \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن،  $x_i$  متغیرهای حالت و  $\dot{x}_i$  مشتق زمانی متغیرهای حالت هستند. همچنین ضریب  $\mathcal{E}$  به منظور اعمال کنترل بیشتر در تنظیم نماهای لیاپانوف افزوده شده است. ضرایب اخیر باید طوری تنظیم شوند که اولاً، معادله‌ها در حالت آشوبناک باشند و ثانیاً، رابطه‌ی میان نماهای لیاپانوف آن و نماهای لیاپانوف سازه، روابط ۳ و ۵ را ارضاء کنند. در صورت انتخاب نامناسب ضرایب مذکور، تحریک حاصل برای اعمال به سازه به منظور شناسایی آسیب مناسب نخواهد بود. در رابطه‌ی ۱۶، با قراردادن مقادیر  $a = 0.1$ ،  $b = 0.5$ ،  $c = 0.15$ ،  $\omega = 0.8$  و  $\mathcal{E} = 0.2$  و به کارگیری الگوریتم ارائه شده توسط ولف و همکاران (۱۹۸۵)<sup>[۲۵]</sup> و لحاظ کردن دقت  $10^{-3}$ ، نماهای لیاپانوف تحریک به صورت رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آیند:

$$\lambda_1^e = 0.42, \lambda_2^e = 0.00, \lambda_3^e = -0.92 \quad (17)$$

$\nu = 0.33$  بوده است. همچنین تحریک آشوبناک در فاصله‌ی ۰/۱۵ متر از تکیه‌گاه گیردار به صورت بار متمرکز، در راستای محور  $Z$  و در وسط عرض تیر اعمال شده است.

مدل سازی تیر اخیر در ابتدا به صورت سه‌بُعدی با المان‌های خطی و ۸ گره‌یی با انتگرال‌گیری کاهش یافته و با در نظر گرفتن ۵ حالت آسیب (مطابق جدول ۱) در سطح مقطع تیر و در محل تکیه‌گاه انجام شده است. همچنین برای هر یک از حالت‌های آسیب، درصد آسیب از ۰ تا ۳۵ در بازه‌های ۵ درصدی افزایش یافته است. یک صفحه‌ی 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 و سه بُعدی) با استفاده از نتایج ارائه شده در نوشتار نیکولز و همکاران (۲۰۰۳)<sup>[۱۰]</sup> و نتایج تحلیلی (در حالت آسیب‌ندیده) راستی‌آزمایی شده‌اند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۳، کمترین تغییرات در مقادیر وابستگی میان جاذب‌ها در حالت آسیب ۱ (آسیب در تمام ضخامت) اتفاق افتاده است. لذا، این حالت به عنوان حالت بحرانی در نظر گرفته شده است. همچنین، به منظور کاهش حجم محاسبات، مدل دوبُعدی با المان‌های درجه‌ی ۲ مربعی و مثلی با انتگرال‌گیری کاهش یافته جایگزین مدل سه‌بُعدی شده است. مش‌بندی مدل دوبُعدی از نظر تعداد و نوع المان به صورت آنچه در نوشتار نیکولز و همکاران (۲۰۰۳)<sup>[۱۰]</sup> ارائه شده است، انجام پذیرفته است.

در تیر یکسر گیردار آلومینیومی ذکر شده، فرکانس‌های طبیعی برای دو مود اول (دو مود اول در روابط مورد نیاز است)، به ترتیب معادل  $10.76 \text{ Hz}$  و  $f_1 = 67.60 \text{ Hz}$  بوده‌اند. به منظور محاسبه‌ی نماهای لیاپانوف سازه به عنوان یک فیلتر و با در نظر گرفتن میرایی متناسب با ماتریس جرم و سختی، رابطه‌ی ۱۲ برای سازه‌ی اخیر برقرار است:

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

با توجه به روش ارائه شده در نوشتار میرویتچ<sup>[۲۹]</sup> (۱۹۹۷)<sup>[۲۴]</sup>، برای ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت، رابطه‌ی ۱۲ امکان توصیف سازه در مختصات مودال با مدل میرایی ویسکوز را به صورت رابطه‌ی ۱۳ فراهم می‌آورد.

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

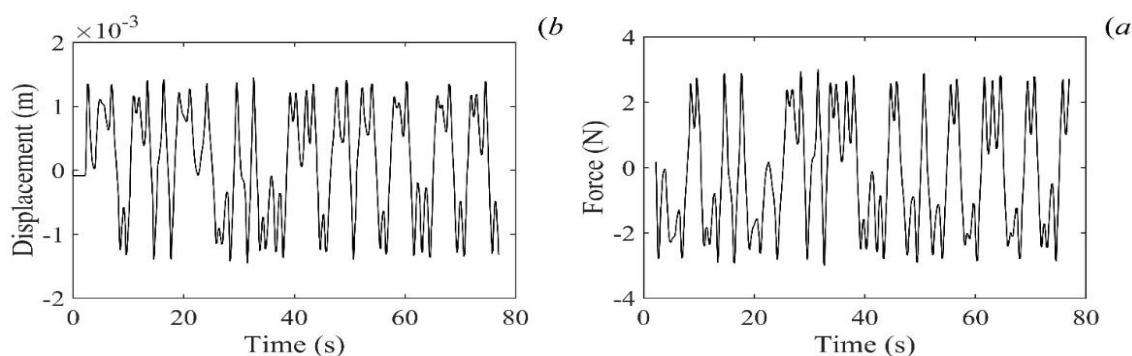
برای هر یک از  $k$  مود سازه و فرکانس‌های مربوط به آن با استفاده از رابطه‌ی اخیر، طیف لیاپانوف سازه به صورت رابطه‌ی ۱۴ نوشته می‌شود<sup>[۱۰]</sup> که به ازاء هر مود ارتعاشی، یک نمای لیاپانوف به دست می‌دهد.

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

با داشتن فرکانس‌های 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 ذکر شده، دو نمای اول لیاپانوف سازه به صورت رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آیند:

$$\lambda_1^s = -0.68, \lambda_2^s = -4.25 \quad (15)$$

در پژوهش حاضر، به منظور ایجاد تحریک از حالت آشوبناک معادله‌های دافینگ (رابطه‌ی ۱۶) استفاده شده است. همچنین با توجه به دو معیاری که برای تنظیم تحریک آشوبناک در قسمت‌های قبل ارائه شده‌اند، به منظور تنظیم



شکل ۴. (a) تحریک آشوبناک تنظیم شده با استفاده از خروجی معادله‌ی دافینگ، (b) جابجایی انتهای آزاد تیر یکسر گیردار آسیب‌نندیده به تحریک آشوبناک اخیر.

جدول ۳. مؤلفه‌های موردنیاز و مقادیر آن‌ها به منظور ثبت، تشکیل، و مقایسه‌ی جاذب‌های به‌دست‌آمده از پاسخ سازه.

Value	Parameter
$10^6$	Number of points time series points ( $N_T$ )
5000	Number of points for attractor comparison (N)
100	Number of points in nearest neighbour for main feature (n)
60	Delay parameter (T)
2	Embedding Dimension (m)
300	Theiler window [۲۱]

هر یک از سری‌های زمانی مذکور در مجموع  $10^5$  نقطه دارند، که در فواصل زمانی یکسان برداشت می‌شوند. به‌منظور بازسازی شکل کلی فضای حالت با استفاده از روش مختصات تأخیریافته، در ابتدا نیاز به تعیین مؤلفه‌های تأخیر و بُعد تعبیه‌سازی است. با استفاده از روش اطلاعات متقابل میانگین، مؤلفه‌ی تأخیر برای استفاده از روش مذکور، مقدار  $T = 60$  به‌دست آمده است. همچنین، به‌منظور کاهش هزینه‌ی محاسباتی بُعد تعبیه‌سازی،  $m = 2$  در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، کمینه‌ی فاصله‌ی زمانی بین نقاط و نزدیک‌ترین همسایگی‌های تشکیل‌شده (بازه‌ی تیلر (۱۹۹۸)، [۲۳]) برابر با ۳۰۰ گام زمانی در نظر گرفته شده است. [۱۰]

با توجه به موارد ذکرشده در نوشتار پیکورا و کورال<sup>۳۰</sup> (۱۹۹۶)، [۲۶] تعداد نقاط در هر همسایگی برای مقایسه‌ی دو جاذب تقریباً برابر با ۰/۱٪ از کل نقاط سری زمانی در نظر گرفته شده است (متغیر تعداد همسایگی‌ها در روش بهبودنیافته موردنیاز است). همچنین تعداد همسایگی‌های لازم در فرآیند مقایسه با توجه به موارد ذکرشده در نوشتار نیکولز و همکاران (۲۰۰۳)، [۱۰] معادل ۵٪ کل نقاط سری زمانی قرار داده شده است. مؤلفه‌های موردنیاز برای انجام فرآیند مقایسه و مقادیر آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در ویژگی بهبودیافته، مقدار متغیر حساسیت  $\delta = 2 \times 10^{-6}$  و  $\delta = 3 \times 10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. همچنین کنترل نزدیک‌ماندن همسایگی‌های تشکیل‌شده در

جدول ۲. مشخصات آسیب واردشده به تیر به صورت جداسازی گره‌های گیردار در تکیه‌گاه.

Damage Percent (%)	Number of Separated Nodes	Damage Case
0	0	0
5	1	1
10	2	2
15	3	3
20	4	4
25	5	5
30	6	6
35	7	7

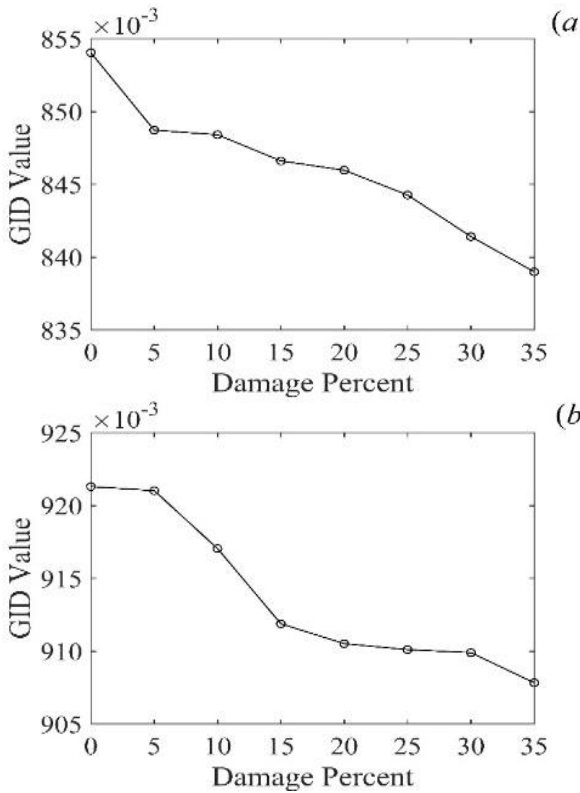
مقادیر به‌دست‌آمده برای نماهای لیاپانوف سازه و تحریک، روابط ۳ و ۵ را ارضاء می‌کنند. همچنین با استفاده از رابطه‌ی ۶، بُعد سیگنال فیلترشده‌ی 2.62  $D =$  به‌دست می‌آید و سیگنال فیلترشده با بُعد پایین خواهد بود. پس می‌توان نتیجه گرفت که تحریک آشوبناک در نظر گرفته‌شده برای سازه مناسب است.

تابع تحریک نهایی، که بر سازه اعمال می‌شود، حاصل ضرب مقادیر متغیر حالت اول ( $x_1$ ) در ضریب مقیاس مناسب ( $F = 1N$ ) است. با توجه به بدون واحد بودن مقادیر معادله‌های دافینگ، وظیفه‌ی ضریب مقیاس مناسب، مقیاس کردن مقادیر به واحد نیروی مناسب موردنیاز برای سازه است. [۱۰] تحریک در نظر گرفته‌شده و پاسخ سازه به آن به ترتیب در شکل ۴ (a) و (b) مشاهده می‌شوند.

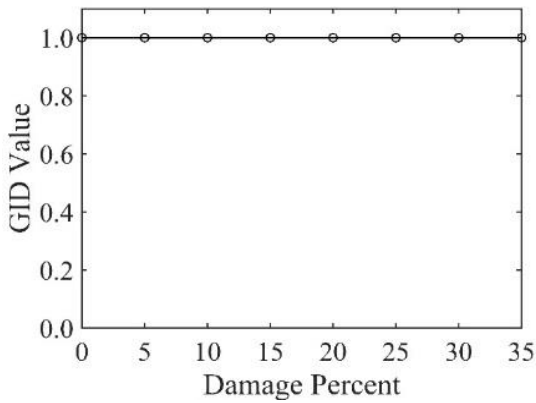
آسیب در پژوهش حاضر به‌صورت جداسازی تیر از محل تکیه‌گاه اعمال شده است (مجموعاً ۲۰ گره در محل تکیه‌گاه وجود دارد). با قراردادن صفحه‌ی صلب در محل تکیه‌گاه، امکان برخورد المان‌های جداسازده با صفحه‌ی صلب در حین اعمال تحریک پیش‌بینی شده است. آسیب از صفر تا ۳۵ درصد با گام ۵ درصدی در هر مرحله افزایش یافته است (جدول ۲).

### ۱.۳. تحلیل و بررسی نتایج حاصل از به‌کارگیری ویژگی بهبودیافته در سازه‌ی تیر یکسر گیردار

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 شده است.



شکل ۵. (a) عملکرد ویژگی وابستگی متقابل بهبودیافته ( $Imp_{GID}$ ) در شناسایی آسیب با ضریب حساسیت  $\delta = 2 \times 10^{-6}$ ؛ و (b) 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.

در جدول ۵، فرکانس‌های طبیعی مود اول سازه در درصدهای آسیب مختلف ارائه شده است. پس از نرمال‌سازی فرکانس‌های مذکور به وسیله فرکانس مود اول حالت آسیب‌نندیده ( $0 < f_{n1} \leq 1$ ) و مقایسه‌ی 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٪ ویژگی بهبودیافته در شناسایی آسیب را در تمامی درصدهای آسیب نسبت به روش مقایسه‌ی تغییرات فرکانس اول سازه نشان می‌دهند. در عین حال، با توجه به این موضوع که روش‌های شناسایی آسیب بر مبنای تحریک آشوبناک، برخلاف روش‌های بر مبنای ویژگی‌های مودال، نیازمند مدلی از سازه برای استخراج ویژگی‌های مودال یا به‌کارگیری

۳ گام زمانی آینده انجام شده است. با استفاده از مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ برای متغیرهای موردنیاز، به مقایسه‌ی جاذب‌های به‌دست‌آمده از پاسخ سازه در دو نقطه‌ی مشخص شده با استفاده از ویژگی‌های بهبودیافته و اصلی پرداخته شده است. نتایج حاصل از عملکرد هر یک از ویژگی‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۵-۵a، با به‌کارگیری ویژگی بهبودیافته با ضریب حساسیت  $\delta = 2 \times 10^{-6}$ ، در اثر افزایش مقدار آسیب، وابستگی دو نقطه‌ی بررسی شده از سازه کاهش یافته است. نزول در مقدار وابستگی دو نقطه، تقریباً به‌صورت یکنواست، که با توجه به ثابت‌بودن میزان تغییرات آسیب، بسیار مناسب است.

افزایش ضریب حساسیت به مقدار  $\delta = 3 \times 10^{-6}$  در شکل ۵-۵b، همچنان نمودار سیر نزولی دارد. ولی در این حالت در بخش‌هایی از نمودار، کاهش شیب نزولی مقادیر وابستگی و نزدیک‌شدن نمودار آن به نمودار با شیب ثابت مشاهده می‌شود. همچنین در این حالت با افزایش ضریب حساسیت، در کل مقدار کاهش وابستگی کمتر بوده است. با افزایش ضریب حساسیت نیز نزدیک‌شدن مقادیر وابستگی و شکل کلی نمودارها و مقادیر مربوط به ویژگی بهبودیافته در شکل ۶، مشاهده می‌شود.

با وجود آنکه نقاط بررسی‌شده در سازه به یکدیگر نزدیک نیستند و همچنین برخلاف مطالعات پیشین، آسیب مابین نقاط مذکور واقع نشده است، اما با توجه به این امر که آن‌ها در فاصله‌ی متفاوتی از آسیب قرار گرفته‌اند، تأثیر متفاوتی نیز از آسیب دریافت می‌کنند. مطابق نتایج ارائه‌شده مشاهده می‌شود که ویژگی بهبودیافته، قابلیت اندازه‌گیری تغییرات ایجادشده هر چند کوچک را میان دو نقطه‌ی مذکور دارد. با توجه به نتایج شکل ۶، با به‌کارگیری ویژگی بهبودیافته میان دو نقطه‌ی در نظر گرفته‌شده از سازه، با وجود افزایش میزان آسیب، همواره مقدار وابستگی واحد ( $I_{GID} = 1$ ) مشاهده می‌شود، 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 ندارد.

با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول ۴، در محاسبه‌ی شاخص نسبت درصد آسیب به مقادیر ویژگی، ویژگی بهبودیافته، عملکرد بهتری را نشان داده است. اختلاف مقادیر شاخص نسبت درصد آسیب با افزایش درصد آسیب، نشان از کاهش بیشتر وابستگی میان جاذب‌های به‌دست‌آمده از نقاط سازه ( $Imp_{GID}$ )، هنگام استفاده از ویژگی بهبودیافته است. فارغ از میزان درصد آسیب، نتایج جدول ۴، اختلاف حدود ۲۰٪ را میان مقادیر ویژگی‌های بهبودیافته و بهبودیافته نشان می‌دهند؛ که بیانگر بهبود عملکرد ویژگی بهبودیافته در تمامی درصدهای آسیب است. همچنین روند صعودی میزان اختلاف، نشانگر افزایش برتری ویژگی بهبودیافته با افزایش میزان آسیب است.

ویژگی بهبودیافته، هزینه‌ی محاسباتی چندانی بر ویژگی اصلی اضافه نخواهد کرد و فقط گام اضافه‌شده، کنترل همسایگی‌ها در گام‌های زمانی آینده است. از طرفی، در محاسبه‌ی 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. مقایسه‌ی عملکرد ویژگی بهبودیافته با  $\delta = 2 \times 10^{-6}$  نسبت به ویژگی بهبودیافته در محاسبه‌ی شاخص نسبت درصد آسیب به مقادیر ویژگی.

Damage Percent (Dp)	Damage percent over improved feature values ( $\frac{D_p}{Imp_{cib}}$ )	The difference percentage of the improved feature values ( $\frac{D_p}{Imp_{cib}}$ ) relative to the unimproved feature values ( $\frac{D_p}{I_{cib}}$ )
0%	-	-
5%	5.89	17.82
10%	11.79	17.87
15%	17.72	18.12
20%	23.64	18.21
25%	29.61	18.45
30%	35.65	18.85
35%	41.72	19.19

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

Damage Percent (Dp)	Natural Frequency of the first Mode ( $f_1$ )	The difference percentage of the improved feature values ( $\frac{D_p}{Imp_{cib}}$ ) relative to the percentage of damage to the normalized first mode frequency ( $\frac{D_p}{f_{n1}}$ )
0%	10.76	-
5%	10.72	17.32
10%	10.71	17.28
15%	10.69	17.30
20%	10.67	17.13
25%	10.64	17.09
30%	10.61	17.17
35%	10.58	17.18

آسیب در سازه‌ها بدل شود. در پژوهش حاضر با افزودن ضریب حساسیت و همچنین اعمال کنترل‌هایی در نحوه‌ی عملکرد ویژگی وابستگی متقابل، علاوه بر رفع محدودیت‌های ذکر شده، حساسیت ویژگی اخیر به آسیب افزایش یافته و همچنین قابلیت کنترل حساسیت مذکور نیز فراهم شده است. در واقع، موارد مطرح شده با رفع نقایص در عملکرد ویژگی وابستگی متقابل، که برخی از آن‌ها در زمان شناسایی آسیب ظاهر می‌شوند، عملکرد بهبودیافته‌ی آن را تضمین می‌کنند. با در نظر گرفتن موارد مطرح شده، بهبود حدود ۲۰ درصدی عملکرد ویژگی بهبودیافته نسبت به ویژگی اولیه، در مسئله‌ی شناسایی آسیب در تیر یکسر گیردار آلومینیومی نتیجه گرفته شده است. همچنین نتایج به دست آمده، بهبود حدود ۱۸ درصدی عملکرد روش بهبودیافته را در مقایسه با روش مقایسه‌ی تغییر فرکانسی مود اول تأیید می‌کنند.

روش‌های تقریبی برای به دست آوردن آن‌ها نیستند، استفاده از روش بهبودیافته در این مورد، سهل الوصول تر نیز به نظر می‌رسد.

#### ۴. جمع بندی

با توجه به مطالب مطرح شده، استفاده از بهبودهای در نظر گرفته شده برای ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل می‌تواند سبب رفع محدودیت‌های ویژگی اخیر و در عین حال حفظ مزایای مناسب آن شود. محدودیت‌های ذکر شده، کاربرد ویژگی حساس به آسیب وابستگی متقابل را به مواردی که مکان آسیب از قبل مشخص است، محدود می‌کنند. به دلیل داشتن ویژگی‌هایی، نظیر: پیچیدگی محاسباتی نسبتاً کم، سرعت تشخیص بالا، و همچنین عدم نیاز به حسگرهای زیاد برای ثبت پاسخ سازه؛ در صورت رفع محدودیت‌های مذکور، ویژگی وابستگی متقابل می‌تواند به گزینه‌ای مناسب جهت شناسایی

#### References- منابع

1. Fan, W. and Qiao, P., 2011. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural Health Monitoring*, 10, pp. 83-111. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921710365419>
2. Doebling, S. W., Farrar, C. R. and Prime, M. B., 1998. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and Vibration Digest*, 30, pp. 91-105. <http://dx.doi.org/10.1177/058310249803000201>

3. Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R. and Czarnecki, J. J., 2003. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. *Los Alamos National Laboratory, USA, 1*, pp. 16. <https://www.osti.gov/servlets/purl/976152>.
4. Das, S., Saha, P. and Patro, S., 2016. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6*, pp. 477-507. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0168-5>
5. Nikkhoo, A., Karegar, H., Mohammadi, R. K. and Hejazi, F., 2020. Improving the performance of the autoregressive method in modal identification of output-only systems using the empirical mode decomposition. *Structures*, pp. 1165-1173. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.006>
6. Nikkhoo, A., Karegar, H. and Karami Mohammadi, R., 2021. Improving the performances of the autoregressive method in modal identification of output-only systems using Hilbert vibration decomposition method. *Sharif Journal of Civil Engineering, 37.2*, pp. 19-28 [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2020.55163.2711>
7. Nikkhoo, A., Shemshaki, E. and Karegar, H., 2024. 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. 111-121 [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j30.2023.61746.3195>
8. Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M. and Inman, D. J., 2021. 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. 077-107. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107077>
9. Sun, X., Ilanko, S., Mochida, Y. and Tighe, R. C., 2023. A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures. *Vibration, 6*, pp. 843-875. <http://dx.doi.org/10.3390/vibration6040051>
10. Nichols, J., Trickey, S., Todd, M. and Virgin, L., 2003. Structural health monitoring through chaotic interrogation. *Meccanica, 38*, pp. 239-250. <https://doi.org/10.1023/A:1022898403359>
11. Nichols, J., Todd, M., Seaver, M. and Virgin, L., 2003. Use of chaotic excitation and attractor property analysis in structural health monitoring. *Physical Review E, 67*, 016209. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.67.016209>
12. Nichols, J., Nichols, C., Todd, M., Seaver, M., Trickey, S. and Virgin, L. 2004., Use of data-driven phase space models in assessing the strength of a bolted connection in a composite beam. *Smart Materials and Structures, 13*, 241. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/001>
13. Overbey, L. and Todd, M., 2008. Damage assessment using generalized state-space correlation features. *Structural Health Monitoring, 7*, pp. 347-363. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921708090568>
14. Torkamani, S., Butcher, E. A., Todd, M. D. and Park, G., 2010. Damage assessment using hyperchaotic excitation and state-space geometry changes. *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, pp. 599-608. <https://doi.org/10.1115/SMASIS2010-3705>
15. Torkamani, S., Butcher, E., Todd, M. and Park, G., 2011. Detection of system changes due to damage using a tuned hyperchaotic probe. *Smart Materials and Structures, 20*, 025006. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/20/2/025006>
16. Torkamani, S., Butcher, E. A. and Todd, M. D., 2016. A real-time approach for damage identification using hyperchaotic probe and stochastic estimation. *Meccanica, 51*, pp. 537-550. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0211-3>
17. Sloboda, A. R. and Kong, C. T. 2022., Boundary transformation vectors: a geometric method of quantifying attractor deformation for structural health monitoring. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 17*, 121004. <https://doi.org/10.1115/1.4055791>
18. Takens, T., 1981. Detecting strange attractors in turbulence. *Lecture Notes in Math., 898*, pp. 336-381. <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0091924>
19. Kostelich, E. J. and Schreiber, T., 1993. Noise reduction in chaotic time-series data: a survey of common methods. *Physical Review E, 48*, 1752. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.48.1752>
20. Fraser, A. M. and Swinney, H. L., 1986. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A, 33*, 1134. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.33.1134>
21. Todd, M., Nichols, J., Olson, C. and Overbey, L., 2005. 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. 264-273. SPIE. <https://doi.org/10.1177/1475921708090568>
22. Arnhold, J., Grassberger, P., Lehnertz, K. and Elger, C. E., 1999. A robust method for detecting interdependences: application to intracranially recorded EEG. *Physica D: Nonlinear Phenomena, 134*, pp. 419-430. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(99\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(99)00140-2)

23. Theiler, J., 1986. Spurious dimension from correlation algorithms applied to limited time-series data. *Physical Review A*, 34, 2427. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.34.2427>
24. Meirovitch, L., 1997. *Principles and techniques of vibrations*. (No Title).
25. Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L. and Vastano, J. A., 1985. Determining lyapunov exponents from a time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 16, pp. 285-317. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90011-9)
26. Pecora, L. M. and Carroll, T. L., 1996. Discontinuous and nondifferentiable functions and dimension increase induced by filtering chaotic data. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 6, pp. 432-439. <https://doi.org/10.1063/1.166186>