

## مرور و مقایسه روش‌های ردیابی آسیب در سازه‌ها با استفاده از

### پارامترهای مودال

البرز میرزابیگی

مهندس ناظر تعمیرات

شرکت نفت مناطق مرکزی ایران

a.mirzabeigy@wogpc.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۸

#### چکیده

پایش وضعیت سازه‌ها به منظور تشخیص آسیب یا هر عاملی که سبب خارج شدن از محدوده ایمن بهره‌برداری گردد، حائز اهمیت است. تحلیل رفتار و ویژگی‌های ارتعاشی سازه‌ها، یکی از روش‌های کم هزینه و قابل اجرا در مقیاس بزرگ برای پایش وضعیت سازه‌ها می‌باشد. وقوع آسیب سبب ایجاد تغییراتی در پارامترهای مودال سازه نظیر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها می‌شود که با بررسی آن‌ها می‌توان به اطلاعاتی در مورد وضعیت سازه دست یافت. در مقاله حاضر، تحقیقات انجام شده در حوزه پایش وضعیت با استفاده از پارامترهای مودال مرور شده و مزایا، معایب و محدودیت‌های استفاده از فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها در ردیابی آسیب مشخص می‌شود. سعی شده که در قالب دو مثال روش‌های مختلف با هم مقایسه شوند. در ابتدا ردیابی آسیب در یک تیر اوپلر- برنولی با چند روش تحلیل شکل مود انجام شده و کارایی آن‌ها با هم مقایسه می‌شود. در ادامه روش‌های معکوس مبتنی بر پارامترهای مودال برای ردیابی آسیب در مدل گسسته یک ساختمان ۵ طبقه مقایسه شده و بهترین ترکیب اطلاعات برای افزایش دقت ردیابی آسیب مشخص می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** پایش وضعیت، ارتعاش، پارامترهای مودال، فرکانس طبیعی، شکل مود، تبدیل موجک

#### ۱. مقدمه

جنبه کاربردی و صنعتی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. استفاده از روش‌های غیرمخرب برای تشخیص سلامت سازه‌ها از موارد غیرقابل اجتناب و مهم می‌باشد که به طور وسیعی در صنایع هوافضا، نفت،

پایش سلامت سازه‌ها و تشخیص آسیب در آن‌ها در مراحل اولیه یکی از موضوعات مهم در مهندسی می‌باشد که هم از جنبه علمی و پژوهشی و هم از

گاز، پتروشیمی، راه آهن، نیروگاه‌ها و ... به کار می‌رود. امروزه تقاضای فزاینده برای مصرف بهینه مواد و انرژی و همچنین اهمیت بالای مسائل زیست‌محیطی، موجب ضرورت طراحی سازه‌ها و ماشین‌آلات با ضرایب اطمینان کمتر (بهینه‌تر) شده است. در نتیجه این نوع طراحی و همچنین اهمیت مسائل مالی و اقتصادی برای بهره‌برداری حداکثری از سامانه‌های مهندسی، وقوع آسیب بسیار محتمل بوده و چنانچه به موقع شناسایی نشود خسارات جبران ناپذیر انسانی و مالی را به دنبال خواهد داشت. در آزمون‌های غیرمخرب<sup>۱</sup>، هدف شناسایی آسیب در مراحل اولیه و قبل از بحرانی شدن شرایط می‌باشد بدون آن که در اثر انجام آزمون غیرمخرب تغییری در وضعیت سیستم ایجاد شود. روش‌های مختلفی برای انجام آزمون غیرمخرب وجود دارد که بسته به تجهیزات و هزینه صرف شده، با دقت‌های متفاوتی قادر به تشخیص آسیب در سازه‌ها و ماشین‌ها می‌باشند. روش‌های غیرمخرب متنوعی نظیر رادیوگرافی، آزمون اولتراسونیک و ... برای تشخیص آسیب در سازه‌ها وجود دارد. این روش‌ها علاوه بر اینکه هزینه‌بر هستند به تجهیزات خاص و همچنین متصدی خبره و آموزش دیده نیاز دارند. از سوی دیگر این روش‌ها به صورت محلی قابلیت استفاده دارند به این مفهوم که برای تشخیص آسیب در یک ناحیه خاص حتماً باید آن ناحیه در دسترس بوده و مورد آزمون قرار گیرد [۱]، این مسئله در مورد سازه‌های بزرگ نظیر پل‌ها مشکل‌ساز است، چراکه بررسی تمام اجزا و قسمت‌های آن به صرف زمان و هزینه زیادی نیاز دارد [۲].

زمانی که در یک سازه آسیبی رخ می‌دهد، پارامترهای مودال سازه نظیر فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و ضرایب میرایی تغییر می‌کنند. به علاوه اینکه تغییر در پارامترهای مودال سبب تغییر پاسخ دینامیکی سازه نیز می‌شود. ایده اصلی در عیب‌یابی با استفاده از تحلیل ارتعاشات سازه بر همین اصل استوار است [۳]، [۴]. از مزایای پایش وضعیت با استفاده از ارتعاشات می‌توان به هزینه پایین و همچنین کلی بودن آن اشاره کرد. کلی بودن به این مفهوم که با اندازه‌گیری پاسخ در یک یا چند نقطه محدود می‌توان اطلاعاتی در مورد سلامت کل سازه بدست آورد. امروزه تحقیقات زیادی بر روی عیب‌یابی با استفاده از آنالیز ارتعاشات به منظور افزایش کارایی و دقت برای کاربردهای عملی انجام می‌پذیرد زیرا این روش‌ها علاوه بر مزایای مذکور دارای قابلیت استفاده دائمی و برخط هستند، که بر اهمیت آن‌ها می‌افزاید. به طور کلی برای پایش وضعیت سازه‌ها چهار مرحله زیر را می‌توان در نظر گرفت [۵]:

۱- تشخیص سالم یا معیوب بودن سازه

۲- تشخیص محل آسیب

۳- تشخیص شدت آسیب

۴- تخمین عمر باقیمانده

در مراحل فوق، مرحله اول با دقت خوبی از طریق آنالیز ارتعاشی انجام‌پذیر است در حالی که مرحله چهارم تنها با استفاده از آنالیز ارتعاشی امکان‌پذیر نیست و مباحث خستگی و شکست نیز باید در نظر گرفته شوند. دقت انجام مراحل دوم و سوم نیز به مولفه‌های متعددی وابسته بوده و امروزه عمده تحقیقات در مورد این دو مرحله انجام می‌شود [۶]، [۷].

اگرچه معمولاً در تست‌های ارتعاشی تحریک و پاسخ در حوزه زمان اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند ولی اغلب تشخیص آسیب در سازه فقط از طریق آنالیز اطلاعات در حوزه زمان کار راحتی نیست. روش مرسوم‌تر استفاده از اطلاعات آنالیز مودال می‌باشد که اطلاعات حوزه زمان به حوزه فرکانس برده می‌شود و اطلاعات مودال از حوزه فرکانس استخراج می‌شوند. در چند دهه گذشته محققین تلاش‌های زیادی را در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان - فرکانس برای آنالیز اطلاعات ارتعاشی به کار برده‌اند. با توجه به اینکه هیچ روش مطمئنی برای تشخیص انواع مختلف آسیب در سازه‌های گوناگون وجود ندارد، به نظر می‌رسد محققین کماکان ناچار به استفاده از اطلاعات هر سه حوزه و اغلب ترکیب آن‌ها برای تشخیص آسیب می‌باشند. در هر حال نگاهی به ادبیات فن و کارهای انجام شده نشان می‌دهد که روش‌هایی که از اطلاعات مودال سازه استفاده می‌کنند، کاربرد بیشتری داشته و توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده‌اند. دلیل این محبوبیت در رشد سریع فناوری‌های مرتبط با آنالیز مودال تجربی و همچنین امکان تعبیر فیزیکی مولفه‌های مودال سازه می‌باشد که به راحتی قابل تفسیر و بررسی هستند و اطلاعات ملموس‌تری نسبت به اطلاعات در حوزه زمان و حوزه فرکانس ارائه می‌دهند [۸]. در یک نگاه کلی روش‌های تشخیص آسیب با استفاده از آنالیز ارتعاشی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- روش‌های مبتنی بر مدل
- روش‌های مبتنی بر پاسخ

در روش‌های مبتنی بر مدل به یک مدل تحلیلی یا عددی از سازه نیاز است در حالی که در روش‌های

مبتنی بر پاسخ فقط پاسخ سیستم اندازه‌گیری شده و از روش‌های پیشرفته تحلیل سیگنال برای تشخیص آسیب استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی مزایا و معایب پارامترهای مودال در پایش وضعیت سازه‌ها پرداخته و تحقیقات و روش‌های پرکاربرد نیز اجمالاً معرفی می‌شوند.

## ۲. فرکانس‌های طبیعی

استفاده از فرکانس‌های طبیعی ساده‌ترین و پرکاربردترین روش پایش وضعیت سازه‌ها می‌باشد که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل این موضوع سادگی اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی فقط با دسترسی به چند نقطه محدود از سازه می‌باشد که می‌تواند اطلاعاتی در مورد کل سازه فراهم کند، به علاوه اینکه فرکانس‌های طبیعی حساسیت کمی به نویز دارند و اطلاعات بدست آمده قابلیت اطمینان مناسبی دارند [۳-۱]. با استفاده از فرکانس‌های طبیعی مرحله اول پایش وضعیت یعنی تشخیص سالم یا معیوب بودن سازه با دقت خوبی انجام‌پذیر است به شرطی که اطلاعات سازه اولیه در دسترس باشد. برای تعیین موقعیت و شدت آسیب باید یک مدل عددی از سازه فراهم باشد در غیر اینصورت اطلاعات ناشی از فرکانس‌های طبیعی کافی نیستند. تشخیص آسیب با استفاده از فرکانس‌های طبیعی به صورت دو مسئله مستقیم و معکوس انجام می‌شود. مسئله مستقیم به صورت تعیین فرکانس‌های طبیعی یک سازه معین در اثر وقوع آسیب در مکان‌های مختلف با شدت گوناگون می‌باشد و نتایج به صورت یک پایه تئوری برای تشخیص آسیب در نظر گرفته می‌شود. گادمانسون [۹] یک روش اغتشاشات مبتنی بر انرژی برای تعیین

تغییرات در فرکانس‌های تشدید چند سازه مختلف در اثر آسیب‌های نظیر ترک، شکاف و سایر تغییرات هندسی ارائه داد. فرمول‌بندی ارائه شده قادر بود علاوه بر احتساب تغییرات در سفتی، تغییرات در جرم سازه را نیز در نظر بگیرد. نتایج این تحقیق برای مسئله مستقیم تشخیص آسیب با استفاده از تغییرات در فرکانس‌های تشدید قابل استفاده بود. لیانگ و همکاران [۱۰] مسئله حساسیت فرکانس‌های تیرهای دوسرمفصل و یک سرگردار به وقوع یک ترک را مورد بررسی قرار دادند و توانستند یک رابطه تحلیلی بین تغییرات مقادیر ویژه فرکانسی و محل و شدت ترک بدست آورند. روش معکوس برخلاف روش مستقیم کاربرد بیشتری در عیب‌یابی و تعیین پارامترهای آسیب دارد و یکی از پژوهش‌های پایه در این زمینه به سال ۱۹۷۸ میلادی بر می‌گردد که آدامز و همکاران [۱۱] برای تشخیص آسیب در میله از روش معکوس با استفاده از فرکانس‌های ارتعاشات طولی بهره جستند. مسینا و همکاران [۱۲] یک شاخص اطمینان برای ضریب همبستگی محل چندین آسیب پیشنهاد دادند. این روش بر اساس حساسیت فرکانس در هر مود به محل آسیب پی‌ریزی شد. بدین صورت که همبستگی آماری بین تغییرات در فرکانس‌های محاسبه شده از مدل تئوری در نتیجه تغییر محل آسیب و تغییرات بین فرکانس‌های اندازه‌گیری شده برای تشخیص آسیب به کار برده می‌شد. این روش دقت بالایی در تشخیص یک یا چند آسیب در یک خرپا و یک قاب متشکل از سه تیر از خود نشان داد. لیانگ و همکاران [۱۳] با استفاده از سه فرکانس خمشی اول، یک روش برای تشخیص محل و شدت ترک در تیرهای دو سر مفصل و یک

سرگردار ارائه دادند. در این تحقیق از حل معادله مشخصه و رسم تغییرات فرکانس در برابر تغییرات محل ترک استفاده شد و نهایتاً با استفاده از تقاطع نمودارها محل و شدت ترک تعیین می‌شد. پاتیل و مایتی [۱۴] یک روش براساس ماتریس انتقال و با استفاده از تغییرات فرکانس در تیرهای اوپلر-برنولی برای شناسایی چندین ترک باز برای شرایط مرزی مختلف ارائه دادند، این روش در ادامه توسعه داده شده و برای تشخیص ترک در لوله‌های حاوی سیال نیز به کار رفت [۱۵].

علیرغم تحقیقات گوناگونی که در زمینه تشخیص آسیب با استفاده از تحلیل فرکانس‌های طبیعی انجام شده است، کماکان چندین محدودیت در زمینه استفاده از این روش‌ها وجود دارد. روش‌های مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی معمولاً از مدل عددی یا تحلیلی سازه برای تشخیص آسیب استفاده می‌کنند و ضعف در مدل‌سازی دقیق سازه‌ها و همچنین شبیه‌سازی آسیب می‌تواند سبب خطا در فرایند تشخیص آسیب شود. به عنوان مثال تئوری اوپلر-برنولی<sup>۲</sup> در مورد تیرهایی که نسبت طول به ضخامت آن‌ها زیاد باشد (بیشتر از ۱۰) نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد در حالی که همین تئوری در مورد تیرهایی که نسبتاً ضخیم یا کوتاه باشند، خطای محسوسی در نتایج ایجاد می‌کند. یکی دیگر از موارد عدم امکان مدل‌سازی دقیق تکیه‌گاه و اتصالات می‌باشد که می‌تواند سبب ایجاد خطا در نتایج مدل شود. همچنین موارد مشابهی در مورد مدل‌سازی آسیب وجود دارد، که سبب ایجاد خطا در مدل می‌شوند. بسیاری از حالات آسیب در سازه امکان مدل‌سازی دقیق ندارند و در مواردی که مدل‌سازی انجام شده محدودیت کاربرد وجود دارد. به

عنوان مثال مدل فتر چرخشی برای ترک در تیر، در مواردی که عمق ترک زیاد باشد و یا سازه تحت تحریک‌های فرکانس بالا قرار گیرد کارایی لازم را از خود نشان نمی‌دهد. مجموعه این محدودیت‌ها در مدل‌سازی دقیق سبب ایجاد خطا در فرایند تشخیص آسیب بر اساس تحلیل فرکانس‌های طبیعی می‌شود.

یکی دیگر از محدودیت‌های روش‌های فرکانسی در کم بودن تغییرات فرکانس‌های طبیعی در برابر آسیب‌های با شدت کم می‌باشد که ممکن است این تغییرات در اثر تغییر فرکانس ناشی از شرایط محیطی و کاری اصلاً قابل شناسایی نباشد و این مشکل سبب محدود شدن این روش‌ها برای اعمال در شرایط کاری واقعی می‌شود هرچند ممکن است در شرایط آزمایشگاهی دقت بسیار بالایی داشته باشند. از دیگر محدودیت‌های روش‌های تشخیص آسیب با استفاده از فرکانس طبیعی عدم وجود جواب یکتا در برخی مسائل می‌باشد. در یک سازه متقارن وقوع یک آسیب یکسان در مکان‌هایی که نسبت به مرکز سازه متقارن هستند، سبب تغییرات یکسانی در کلیه فرکانس‌های طبیعی شده و مسئله با استفاده از روش‌های تحلیل فرکانس طبیعی جواب یکتایی ندارد. مشابه این مسئله می‌تواند در سازه‌های نامتقارن برای آسیب‌هایی با شدت مختلف و در مکان‌های مختلف رخ دهد. این مسئله زمانی که چندین آسیب همزمان در سازه رخ می‌دهند، اهمیت بیشتری می‌یابد [۱۶].

### ۳. میرایی

میرایی سازه‌ای نیز از پارامترهای مودال می‌باشد و می‌تواند به عنوان شاخصی از وقوع آسیب در نظر گرفته شود اما با توجه به اینکه میرایی ماهیت

پیچیده‌ای دارد و مدل‌سازی میرایی ناشی از آسیب در سازه‌ها دشوار است، معمولاً از میرایی برای پایش وضعیت استفاده نمی‌شود و تمرکز بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مود می‌باشد که تغییرات سختی سازه‌ای را بهتر و ساده‌تر نمایش می‌دهند.

### ۴. شکل مود

مزایای استفاده از روش‌های مبتنی بر تحلیل توابع شکل مود در مقایسه با روش‌های مبتنی بر تحلیل فرکانس‌های طبیعی در تشخیص آسیب به راحتی قابل استنباط هستند. مهم‌ترین مزیت روش‌های مبتنی بر تحلیل توابع شکل مود را می‌توان محتویات وابسته به مکان اطلاعات شکل مود دانست. این ویژگی سبب می‌شود حساسیت بیشتری به آسیب در اطلاعات شکل مود وجود داشته باشد که فرایند تشخیص چندین آسیب در سازه را ساده‌تر می‌کند. مزیت دیگر استفاده از شکل مود نسبت به فرکانس‌های طبیعی را می‌توان در حساسیت کمتر اطلاعات استخراج شده به تغییرات شرایط محیطی نظیر دما دانست [۱۷]. البته باید در نظر داشت که اندازه‌گیری شکل مود نسبت به اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی دشوارتر است و شکل مود نسبت به فرکانس‌های طبیعی حساسیت بیشتری به نویز دارد.

در دهه‌های گذشته تحقیقات متنوعی در زمینه استفاده مستقیم و غیرمستقیم از شکل مود برای تشخیص آسیب صورت پذیرفته است. با توجه به دسته‌بندی ارائه شده در مراجع مختلف می‌توان این روش‌ها را به دو دسته "روش‌های سنتی استفاده از شکل مود" و "تحلیل شکل مود با استفاده از

روش‌های نوین پردازش سیگنال " تقسیم کرد. در روش‌های سنتی معمولاً تلاش بر این بوده است که یک رابطه بین محل و شدت آسیب با تغییرات شکل مود از طریق یک مدل تئوری و یا نمونه آزمایشگاهی برقرار شود. این روش‌ها به اطلاعات سازه هم در حالت سالم و هم در حضور عیب نیاز دارند. با توسعه روش‌های جدید برای پردازش سیگنال، این روش‌ها در زمینه تشخیص آسیب استفاده شده و روش‌های جدیدی برای تشخیص آسیب پیشنهاد شده‌اند. این روش‌های نوین پردازش سیگنال می‌توانند به اطلاعات استخراج شده از شکل مود بعد از وقوع آسیب یا تفاوت شکل مود قبل و بعد از وقوع آسیب اعمال شوند و محل آسیب را که در واقع به صورت یک ناپیوستگی در اطلاعات شکل مود نهفته است مشخص کنند. باید توجه داشت سیگنال ورودی این روش‌ها به صورت اطلاعات وابسته به مکان و نه زمان می‌باشد.

هو و افضل [۱۸] با استفاده از یک الگوریتم آماری و تفاوت دو شکل مود اول تیرهای چوبی قبل و بعد از وقوع آسیب یک نمایشگر (شاخص) جدید پیشنهاد دادند. کارایی الگوریتم برای تعداد، شدت و محل‌های مختلف آسیب نشان داده شد. پاوار و همکاران [۱۹] تاثیر آسیب بر تیر دو سرگیردار را با استفاده از آنالیز فوریه توابع شکل مود در حوزه مکانی انجام دادند. مدل اجزای محدود تیر دو سر مفصل برای استخراج شکل مود مورد استفاده قرار گرفت و آنالیز فوریه بر روی آن انجام شد که نتایج حاکی از تاثیر قابل توجه وقوع آسیب بر ضرایب هارمونیک‌های آنالیز فوریه شکل مود بود. در ادامه یک شاخص آسیب به صورت برداری از ضرایب آنالیز فوریه شکل مود تعریف شد و

شبکه عصبی برای شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه نتایج حکایت از دقت مناسب این روش در تشخیص آسیب داشت اما کاربرد این روش به تیر با شرایط تکیه‌گاهی دو سرگیردار محدود می‌باشد. عبدو و هوری [۲۰] پیشنهاد دادند که از چرخش شکل مود (مشقق مرتبه اول) برای تشخیص آسیب استفاده شود. آن‌ها با استفاده از مدل عددی اجزای محدود ورق‌های یک سرگیردار و کاملاً مفصلی دارای آسیب نشان دادند که چرخش شکل مود کارایی بهتری نسبت به خود شکل مود در تعیین محل چندین آسیب دارد.

تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های سنتی استفاده از شکل مود برای تشخیص آسیب نشان می‌دهد که این روش‌ها بسته به نوع سازه و شرایط تکیه‌گاهی در برخی نواحی به وجود آسیب حساس نیستند. به عنوان مثال در یک تیر دو سرگیردار به آسیب در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها حساس نیستند. همچنین اگرچه توانایی تشخیص محدوده نسبی آسیب را دارند ولی تعیین محل دقیق آسیب بدون استفاده از روش‌های شناخت الگو و هوش مصنوعی بعضاً امکان‌پذیر نیست.

یکی از پردازش‌های نسبتاً ساده که دقت عیب‌یابی با استفاده از شکل مود را افزایش می‌دهد، استفاده از تابع انحنای<sup>۳</sup> شکل مود می‌باشد. این روش نخستین بار توسط پاندی و همکاران [۲۱] پیشنهاد شد و در واقع مشقق مرتبه دوم شکل مود می‌باشد. با توجه به اینکه شکل مود معمولاً به صورت گسسته اندازه‌گیری می‌شود برای محاسبه مشقق مرتبه دوم از تقریب تفاضلات مرکزی به صورت زیر استفاده شد:

$$v_i'' = \frac{v_{i-1} + v_{i+1} - 2v_i}{h^2} \quad (1)$$

در رابطه ۱،  $v$  برای بیان جابجایی یا مقدار دامنه در شکل مود به کار می‌رود و  $i-1$ ،  $i$  و  $i+1$  سه نقطه متوالی در شکل مود هستند،  $h$  نیز بیانگر فاصله بین دو نقطه متوالی اندازه‌گیری شکل مود (فاصله حسگرها) می‌باشد. نتایج نشان می‌دادند که تفاوت بین انحنا شکل مود قبل و بعد از وقوع آسیب شاخص مناسبی برای تشخیص محل آسیب می‌باشد. اگرچه در تحقیقات مختلف نشان داده شد تابع انحنا دقت بیشتری از خود شکل مود در تشخیص آسیب دارد اما در تحقیق عبدال وهاب و دروئک [۲۲] اشاره شد که تفاوت بین انحنا مودهای مرتبه بالا قبل و بعد از وقوع آسیب ممکن است سبب قله‌هایی در نقاطی غیر از محل آسیب شود و برخی نقاط سالم در سازه به عنوان آسیب شناسایی شوند. برای جلوگیری از وقوع این حالت توصیه شد که فقط از تفاوت انحنا مودهای مرتبه پایین برای تشخیص آسیب استفاده شود.

در سال‌های اخیر روش‌های مبتنی بر پاسخ سازه معیوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند با این فرض که آسیب سبب تغییرات فرکانس بالا در سیگنال پاسخ می‌شود. روش‌های پردازش سیگنال نظیر تبدیل موجک<sup>۴</sup> [۲۳-۲۵] و ابعاد فراکتالی<sup>۵</sup> [۲۶، ۲۷] که به نسبت سایر روش‌ها نوین محسوب می‌شوند، برای تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج قابل قبولی نیز بدست داده‌اند. باید در نظر داشت زمانی که فقط از اطلاعات شکل مود سازه معیوب برای تشخیص آسیب استفاده می‌شود، به دلیل محدودیت ذاتی روش‌های پردازش سیگنال فقط محل آسیب قابل تشخیص است و برای تعیین شدت باید از

الگوریتم‌های دیگری استفاده کرد. در ادامه دو روش تبدیل موجک و ابعاد فراکتالی به اختصار شرح داده می‌شوند.

#### ۴-۱. تبدیل موجک

استفاده از تبدیل فوریه یا در شکل عملی آن تبدیل فوریه سریع از روش‌های کلاسیک و مطمئن برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها می‌باشد که در مسائل مختلفی به کار رفته است. این روش سیگنال را از حوزه زمان/مکان به حوزه فرکانس انتقال داده و محتوای فرکانسی سیگنال اولیه را آشکار می‌سازد. ضعف این روش در استخراج اطلاعات سیگنال‌های غیرایستا به دلیل عدم امکان نمایش زمان وقوع یک فرکانس خاص، سبب شد که روش‌های زمان-فرکانس از جمله تبدیل فوریه زمان کوتاه کاربرد بیشتری پیدا کرده و برای تحلیل سیگنال‌های غیرایستا مورد استفاده قرار گیرند. مشکلی که در استفاده از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه وجود دارد با استفاده از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ به این شکل توضیح داده می‌شود که دقت وضوح زمانی و فرکانسی با یکدیگر رابطه معکوس دارند به نحوی که هرچه وضوح زمانی افزایش یابد وضوح فرکانسی کاهش یافته و بالعکس. برای غلبه بر این مشکل، استفاده از تحلیل‌های چند وضوحی مدنظر قرار گرفت. برای تحلیل چند وضوحی از توابعی استفاده می‌شود که در بازه‌های زمانی کوتاه - معمولاً در میانه سیگنال - دارای اجزاء با فرکانس بالا بوده و در بازه‌های زمانی طولانی‌تر دارای اجزاء با فرکانس پایین باشند. تبدیل موجک یکی از روش‌هایی است که با رویکرد چندوضوحی به تجزیه و تحلیل سیگنال می‌پردازد و به صورت کلی به تبدیل موجک پیوسته و گسسته

دسته‌بندی می‌شود که در ادامه توضیحات مربوط به تبدیل موجک پیوسته ارائه می‌شود. برای سیگنال  $y(t)$  تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$C(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (2)$$

در تبدیل فوق  $\tau$  پارامتر انتقال و  $s$  پارامتر مقیاس می‌باشند.  $\Psi(t)$  تابع تبدیل است و موجک مادر نامیده می‌شود که  $\Psi^*(t)$  تابع مزدوج مختلط آن می‌باشد. هر تابع موجک به زبان ریاضی دارای شرایط زیر است:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4)$$

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (5)$$

رابطه ۳ بیان می‌کند که میانگین تابع موجک برابر صفر است. رابطه ۴ به محدود بودن انرژی تابع موجک دلالت دارد. اگر تبدیل فوریه تابع موجک را با  $\Psi(\omega)$  نمایش دهیم، رابطه ۵ شرط معکوس‌پذیری تابع موجک را نشان می‌دهد. باید در نظر داشت در تبدیل فوریه پارامتر فرکانس به صورت مستقیم حضور ندارد ولی پارامتر مقیاس که به طور معکوس با فرکانس رابطه دارد می‌تواند برای جبران این نقصان به کار گرفته شود.

#### ۴-۲. روش ابعاد فراکتالی

ابعاد فراکتالی را یک شاخص آماری از پیچیدگی تعریف کرده‌اند که بیان می‌کند چگونه جزئیات در یک الگو (طرح) با مقیاسی که در آن اندازه‌گیری می‌شوند تغییر می‌کند. ابعاد فراکتالی کاتز<sup>۶</sup> برای یک شکل موج (منحنی یا خم) دوبعدی به صورت زیر تعریف می‌شود: یک شکل موج می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از نقاط متوالی  $s = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_N]^T$  در نظر گرفته شود که  $s = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$  و  $x_i$  مولفه افقی و  $y_i$  مولفه قائم هر نقطه هستند. ابعاد فراکتالی برای این شکل موج به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$FD_K = \frac{\log(n)}{\log(n) + \log(d/L)} \quad (6)$$

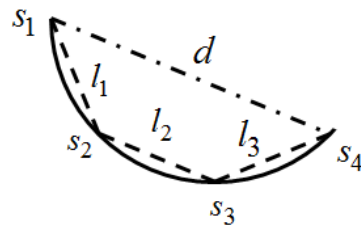
در رابطه ۶،  $n$  بیانگر تعداد بازه‌های مکانی در نمونه‌برداری است.  $d$  به عنوان قطری در نظر گرفته می‌شود که بیشترین فاصله ممکن را بین اولین نقطه مجموعه و یکی دیگر از نقاط مجموعه تخمین می‌زند.  $L$  نیز به صورت مجموع فاصله بین نقاط متوالی در نظر گرفته می‌شود. به بیان ریاضی داریم:

$$d = \max_i \|s_i - s_1\| \quad (7)$$

$$L = \sum_{j=1}^n l_j, l_j = \|s_{j+1} - s_j\| \quad (8)$$

در روابط فوق،  $\| \cdot \|$  بیانگر فاصله اقلیدسی<sup>۷</sup> بین دو نقطه است. از نظر هندسی  $d$  و  $L$  برای یک خم در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. برای تشخیص آسیب با استفاده از ابعاد فراکتالی یک پنجره به طول  $M$  انتخاب شده ( $M$  تعداد نقاط داده‌برداری شده) و در طول شکل مود حرکت داده می‌شود و در هر موقعیت قرارگیری پنجره مقدار  $FD$  برای آن مقدار از شکل مود که درون پنجره قرار دارد

محاسبه می‌شود. محل آسیب خود را به صورت یک قله در منحنی حاصله از این روش نشان می‌دهد که بیانگر بی‌نظمی محلی در شکل مود ناشی از وجود آسیب می‌باشد. در مرجع [۲۷] از اندازه قله (دامنه) برای تخمین شدت آسیب استفاده شد.



شکل ۱. مفاهیم هندسی \$d\$ و \$L\$ برای یک خم در روش فراکتالی کاتر

### ۵. روش معکوس برای ردیابی آسیب

روش معکوس یکی از روش‌های تشخیص آسیب در سازه است که در دسته روش‌های مبتنی بر مدل قرار می‌گیرد. در این روش یک مدل عددی از سازه ایجاد می‌شود و پارامترهای این مدل چنان تعیین می‌شود که ویژگی‌های مدنظر آن با ویژگی‌های سازه تحت پایش کم‌ترین اختلاف را داشته باشد. برای این منظور یک تابع موسوم به تابع هدف تعریف می‌گردد که شامل ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری سازه باشد و بتواند تاثیر آسیب را به خوبی نشان دهد. زمانی که اختلاف مقدار تابع هدف برای سازه تحت پایش و مدل عددی ایجاد شده به حداقل مقدار ممکن برسد، می‌توان آسیب را با استفاده از پارامترهای مدل عددی تشخیص داد. تعریف مناسب تابع هدف از مهم‌ترین بخش‌های روش معکوس برای ردیابی آسیب در سازه‌ها می‌باشد. برای تعریف تابع هدف عمدتاً از پارامترهای مودال استفاده شده است، اگرچه در برخی از تحقیقات اطلاعات حوزه زمان نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. زمانی که مبنا استفاده از پارامترهای مودال برای

تعریف تابع هدف است، انرژی کرنشی<sup>۸</sup> مودال حساس‌ترین شاخص به وقوع آسیب می‌باشد و منجر به نتایج خوبی در عیب‌یابی سازه‌ها می‌گردد. انرژی کرنشی مودال برای المان \$e\$ یک سازه در مود \$i\$ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{mse}_e^i = \frac{1}{2} \phi_e^{iT} \mathbf{K}_e \phi_e^i \quad (9)$$

در رابطه ۹، \$\mathbf{K}\_e\$ ماتریس سفتی المان \$e\$ و \$\phi\_e^i\$ مقادیر تغییر شکل متناظر با درجات آزادی المان در مود \$i\$ می‌باشند. زمانی که سازه تحت پایش از نوع خرابا باشد، درجات آزادی در هر گره از المان‌های مجموعه، متناظر با جابجایی در آن گره است و استفاده از انرژی کرنشی مودال به راحتی میسر بوده و به نتایج قابل قبولی نیز منجر شده است. زمانی که سازه از نوع تیر باشد، در هر گره از المان‌های سیستم، دو درجه آزادی وجود دارد که یکی مربوط به جابجایی عرضی گره و دیگری مربوط به شیب یا تغییر شکل زاویه‌ای در آن گره است. همان‌گونه که می‌دانیم اندازه‌گیری تغییر شکل زاویه‌ای در یک گره بسیار دشوار می‌باشد. یکی از روش‌ها برای این کار استفاده از تقریب تفاضلات محدود با استفاده از جابجایی عرضی در هر گره است. استفاده از مشتق جابجایی برای تقریب شیب علاوه بر اینکه خود منشا خطا می‌باشد، به دلیل اینکه به یک شبکه متراکم از اطلاعات جابجایی عرضی سازه در فواصل کم نیاز دارد، در عمل نیز به سختی قابل پیاده‌سازی بوده و بنابراین برای هر سازه‌ای قابلیت استفاده ندارد. توابع هدفی که با استفاده از پارامترهای مودال تعریف شده و به طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در ادامه معرفی می‌شوند. اولین تابع هدف براساس فرکانس‌های طبیعی سیستم و به صورت زیر پایه‌گذاری شده است [۲۹]:

$$\text{Obj}_3: \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{\omega_i^m}{\omega_i^e}\right)^2} + \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N (1 - \text{MAC}_i)^2$$

شکل مود استفاده شده در توابع هدف دوم و سوم، شکل مود ناقص بوده و تنها اطلاعات مربوط به جابجایی عرضی هر گره را در خود دارد. همچنین لازم به ذکر است که دومین جمله از تابع هدف رابطه ۱۳، در بعضی از تحقیقات به صورت مستقل به عنوان یک تابع هدف مبتنی بر شکل مود مورد استفاده قرار گرفته است [۵].

یکی دیگر از مفاهیمی که با استفاده از پارامترهای مودال تعریف شده و برای ردیابی آسیب مورد استفاده قرار گرفته است، انعطاف‌پذیری مودال است. در یک سازه که  $N$  شکل مود آن در فرم گسسته به ترتیب با بردارهای  $\phi_1, \phi_2$  و ... نمایش داده می‌شوند، ماتریس توابع شکل مود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n] \quad (14)$$

و انعطاف‌پذیری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = \Phi^T \Omega^{-1} \Phi \quad (15)$$

که  $\Omega$  یک ماتریس قطری از فرکانس‌های طبیعی سازه به صورت زیر است:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n^2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$$

پاندی و بیسواس [۳۱] پیشنهاد دادند که از انعطاف‌پذیری مودال برای تشخیص محل آسیب در سازه‌ها استفاده شود. آن‌ها از تفاوت انعطاف‌پذیری قبل و بعد از وقوع آسیب برای تشخیص محل آسیب استفاده کردند. در ادامه این روش برای ردیابی آسیب در سازه‌های

$$\text{Obj}_1: \sum_{i=1}^N \frac{(\omega_i^e - \omega_i^m)^2}{i} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $\omega_i^e$  و  $\omega_i^m$  به ترتیب فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده از نمونه تجربی و مدل تئوری هستند.  $i$  و  $N$  نیز به ترتیب بیانگر شماره مود و تعداد مودهای اندازه‌گیری شده هستند.

دومین تابع هدف به صورت زیر با استفاده از شکل مودهای اندازه‌گیری شده تعریف شده است [۵]:

$$\text{Obj}_2: \sum_{i=1}^N \|\{\phi_i^e\} - \{\phi_i^m\}\| \quad (11)$$

$\phi_i^m$  و  $\phi_i^e$  به ترتیب بردارهای شکل مود تجربی و مدل عددی هستند. تابع هدف نیز به صورت فاصله اقلیدسی بین این دو شکل مود تعریف شده است.

سومین تابع هدف از معیار اطمینان مودال<sup>۹</sup> استفاده می‌کند. این شاخص به عنوان معیاری برای سنجش میزان وابستگی اطلاعات دو بردار به کار می‌رود که در ارتعاشات این دو بردار معمولاً توابع شکل مود در فرم گسسته هستند. شاخص MAC بین دو بردار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{MAC}_i = \frac{(\phi_{ie}^T \phi_{im})^2}{(\phi_{ie}^T \phi_{ie})(\phi_{im}^T \phi_{im})} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲،  $i$  بیانگر شماره مود،  $\phi_{im}$  شکل مود  $i$ ام محاسبه شده مدل تئوری،  $\phi_{ie}$  شکل مود  $i$ ام اندازه‌گیری شده تجربی و علامت T بیانگر ترانپوز می‌باشند. مقدار این شاخص از صفر تا یک متغیر است که صفر مربوط به زمانی است که هیچ‌گونه وابستگی بین اطلاعات دو بردار وجود ندارد و یک مربوط به زمانی است که دو بردار کاملاً مشابه باشند. نهایتاً تابع هدف به صورت ترکیبی از فرکانس‌های طبیعی و توابع شکل مود و به صورت زیر تعریف شده است [۳۰]:

مختلف توسعه داده شد. ژانگ و آکتان [۳۲] هرکدام از درایه‌های ماتریس انعطاف‌پذیری را با رابطه زیر نشان دادند:

$$G_{i,j} = \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k(i)\phi_k(j)}{\omega_k^2} \quad (17)$$

مقدار انعطاف‌پذیری در رابطه ۱۷ بیانگر میزان تغییر شکل نقطه  $i$  سازه در اثر اعمال بار واحد در نقطه  $j$  می‌باشد. در یک سازه خطی می‌توان گفت تغییر شکل نقطه  $i$  سازه در اثر اعمال بار یکنواخت در سرتاسر سازه با کمک رابطه ۱۷ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u(i) = \sum_{j=1}^n G_{i,j} = \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k(i) \sum_{j=1}^n \phi_k(j)}{\omega_k^2} \quad (18)$$

این مفهوم به عنوان سطح بار یکنواخت<sup>۱۰</sup> یا به اختصار ULS شناخته شده و برای یک سازه به صورت بردار تغییر شکل سازه در اثر بار یکنواخت و با استفاده از رابطه ۱۸ برای هر نقطه تعریف می‌شود. در مراجع [۳۳، ۳۴] از ULS برای تشخیص آسیب در سازه‌ها استفاده شده است. در این مراجع با ULS مشابه یک بردار برخورد شده و از آنالیزهای انجام گرفته بر روی شکل مود برای تحلیل آن استفاده شده است. در مرجع [۳۵] از سطح بار یکنواخت برای تعریف تابع هدف به صورت زیر استفاده شده است:

$$\text{Obj}_4: \sum_{i=1}^{N_f} \left| 1 - \frac{\text{ULS}^m(i)}{\text{ULS}^*(i)} \right| \quad (19)$$

در رابطه ۱۹،  $\text{ULS}^m$  متعلق به مدل عددی سازه و  $\text{ULS}^*$  متعلق به سازه تحت پایش می‌باشد.  $N_f$  تعداد نقاط اندازه‌گیری شکل مود است. علاوه بر توابع هدف معرفی شده، اشکال دیگری از توابع هدف با استفاده از پارامترهای مودال تعریف شده‌اند که تفاوت چندانی با

توابع معرفی شده نداشته و منجر به نتایج متفاوتی نشده‌اند بنابراین از ذکر آن‌ها صرف‌نظر می‌شود.

## ۶. تلفیق با فناوری‌های نوین

امروزه طراحی سازه‌ها با در نظر گرفتن ملاحظات صرفه‌جویی مواد و انرژی پیچیده‌تر شده و ابعاد سازه‌ها به مراتب بزرگ‌تر شده است. به موازات این مساله، زیرساخت‌های حیاتی به هم پیوسته شده‌اند و از صنعت و حمل و نقل تا حوزه سلامت و سرگرمی به یکدیگر وابسته شده‌اند و اخلاص در هر یک از این زیرساخت‌ها می‌تواند سایر حوزه‌ها را با چالش مواجه کند. همین امر باعث شده تا روش‌ها و فناوری‌های نوین کاربردهای جدیدی یافته و به ارتقا کارایی روش‌های سنتی کمک نمایند. مختصراً می‌توان سه نسل برای توسعه روش‌های پایش وضعیت سازه در نظر گرفت. در نسل اول پایش به صورت دستی و دوره ای با برخی ابزارآلات مکانیکی و بازرسی بصری انجام می‌شد. نسل دوم پایش وضعیت با انقلاب حسگرها و اهمیت یافتن تحلیل ارتعاشات شکل گرفت. نسل سوم نیز با توسعه توان پردازش برای پایش بلادرنگ و امکانات عصر دیجیتال به پیش می‌رود. انجام روش‌های سنتی پایش وضعیت سازه‌ها در مواجهه با سازه‌های بزرگ مقیاس و پیچیده، زمان واکنش سریعی ندارند و هزینه نگهداری آن‌ها قابل توجه است. با توجه به نیاز به شناسایی به موقع و دقیق آسیب در سازه‌های بزرگ مقیاس، متخصصان این عرصه به استفاده از فناوری‌های نوین نظیر اینترنت اشیا<sup>۱۱</sup>، یادگیری ماشین<sup>۱۲</sup> و دوقلو دیجیتال<sup>۱۳</sup> روی آورده‌اند که سبب ایجاد تحولی چشمگیر در این زمینه شده است.

اینترنت اشیاء به شبکه‌ای از اشیای فیزیکی متصل به اینترنت گفته می‌شود که قادر به جمع‌آوری و تبادل اطلاعات هستند. پایش وضعیت سازه‌ها در مسیر بهبود کارایی خود به سمت حذف کابل و پیاده‌سازی شبکه جمع‌آوری اطلاعات بی‌سیم برای پایش برخط و مبتنی بر زمان واقعی حرکت کرده است [۳۶].

اینترنت اشیاء با ایجاد یک شبکه گسترده از حسگرهای هوشمند و متصل، ستون فقرات جمع‌آوری داده را تشکیل می‌دهد. این حسگرها قادرند به صورت دائمی و در زمان واقعی<sup>۱۴</sup>، پارامترهای مختلفی همچون ارتعاش، دما، فشار و ... را از سازه‌ها، تجهیزات و حتی محیط اطراف اندازه‌گیری و ثبت کنند. داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرها از طریق یک پروتکل ارتباطی بی‌سیم نظیر<sup>۱۵</sup> به یک پلتفرم ابری ارسال می‌شوند. این حجم عظیم و پیوسته از داده‌های خام، که به داده‌های کلان<sup>۱۶</sup> معروف است، ماده اولیه ضروری برای تحلیل را فراهم می‌سازد [۳۷]. داده‌های خام و عظیم کسب شده به خودی خود نمی‌تواند مفید باشد؛ بلکه ارزش واقعی در استخراج الگوهای نهفته در آن‌ها است، که با استفاده از یادگیری ماشین بدست می‌آیند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین قادرند این داده‌های حجیم را با سرعتی زیاد پردازش کنند. آن‌ها با یادگیری از داده‌های تاریخی، الگوهای رفتاری طبیعی یک سازه را می‌آموزند و قادرند کوچک‌ترین انحراف از این الگوهای نرمال را که نشانه‌ای از یک ناهنجاری یا عیب بالقوه است، با دقت بالا شناسایی کنند [۳۸]. ویژگی مهم‌تر قابلیت پیش‌بینی است که یادگیری ماشین را به یک ابزار آینده‌نگر نیز تبدیل می‌کند. این الگوریتم‌ها می‌توانند با تحلیل روند تغییرات داده‌ها در طول زمان، احتمال وقوع خرابی در

آینده را پیش‌بینی کرده و هشدارهای لازم را هفته‌ها یا حتی ماه‌ها زودتر صادر کنند [۳۹]. تلفیق هوشمندانه اینترنت اشیاء و یادگیری ماشین، مدل پایش را از یک رویکرد واکنشی و پایش‌گرانه بر اساس زمان به یک مدل آینده‌نگر و مبتنی بر شرایط ارتقا می‌دهد. بهره‌گیری از ادغام این فناوری‌ها به افزایش چشمگیر ایمنی، کاهش زمان توقف بهره‌برداری، بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع، افزایش طول عمر مفید سازه‌ها و در نهایت کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیاتی و نگهداری منجر می‌شود.

دنیس و همکاران [۴۰] با استفاده از حسگرهای بدون سیم و مفهوم اینترنت اشیاء به پایش سلامت یک تیر بتنی تقویت شده پرداختند. آن‌ها تیر بتنی را به شبکه‌ای از حسگرهای بدون سیم مجهز کردند و با روش خمش چهار نقطه‌ای بارگذاری/ باربرداری تیر را انجام داده و اطلاعات بار- تغییر شکل را ثبت کردند، سپس تیر را تحت تحریک ضربه قرار داده و اطلاعات شتاب را ثبت و تغییرات فرکانس‌های طبیعی را استخراج کردند. نهایتاً با پردازش اطلاعات فرایند شناسایی آسیب را انجام دادند که حکایت از موفقیت اینترنت اشیاء در تشخیص برخط و زمان واقعی برای این نمونه آزمایشگاهی داشت. ماتیلو و همکاران [۴۱] شبکه حسگرهای مبتنی بر اینترنت اشیاء را برای ارزیابی سلامت یک تیر آلومینیومی به کار بردند. در این تحقیق از حسگرهای شتاب سه‌جهته و تحریک پایه به همراه یک شاخص آسیب کلی برای ارزیابی سلامت سازه استفاده شد. روش پیشنهادی به اطلاعات سازه سالم احتیاج داشت و با دقت خوبی وقوع آسیب در سازه را به صورت برخط تشخیص می‌داد. در پایش سلامت سازه با استفاده از یادگیری

ماشین، ویژگی‌های معنادار که برخی نظیر فرکانس‌های طبیعی دارای تعبیر فیزیکی هستند، استخراج می‌شوند. سپس یک مدل پایه که مدل یادگیری ماشین است با استفاده از اطلاعات سازه سالم ایجاد شده و ماشین می‌آموزد که رفتار نرمال و بدون آسیب سازه چگونه است. پس از ایجاد مدل پایه، داده‌های جدید به مدل وارد می‌شوند که می‌توانند حاوی اطلاعات آسیب نیز باشند. ماشین با مدل‌های آماری و الگوریتم‌های مختلف بررسی می‌کند که داده جدید با داده حالت سالم تفاوت معناداری داشته باشد، که اگر به این نتیجه برسد داده جدید به عنوان ناهنجاری یا آسیب احتمالی معرفی خواهد شد. برای ایجاد مدل پایه و الگوریتم‌های شناسایی روش‌های گوناگونی نظیر شبکه عصبی<sup>۱۷</sup>، ماشین بردار پشتیبان<sup>۱۸</sup>، رمزگذار خودکار<sup>۱۹</sup>، نزدیک‌ترین همسایه و امثالهم وجود دارد. روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین به طرز موفقیت‌آمیزی در پایش سلامت یک پل خرابایی با دهانه ۵۹/۲ متر ساخته شده از فلز [۴۲]، یک پل راه آهن رشته فلزی زه کمانی به طول ۱۱۵ متر [۴۳]، تیر کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن [۴۴] و ورق فلزی [۴۵] به کار رفته‌اند.

## ۷. مثال‌های عددی

در این بخش دو مثال عددی برای بررسی کارایی روش‌های ذکر شده در بخش‌های قبل ارائه می‌شوند. اولین مثال مربوط به یک تیر اوپلر-برنولی با تکیه‌گاه گیردار-الاستیک است که روش‌های مربوط به ردیابی آسیب با استفاده از تجزیه و تحلیل شکل مود در مورد آن به کار می‌رود. در مثال دوم مدل گسسته یک

ساختمان چند طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد و کارایی روش‌های مختلف ردیابی آسیب در آن بررسی می‌شود.

### ۷-۱. مثال اول: تیر اوپلر-برنولی

تیر نشان داده شده در شکل ۲ را در نظر بگیرید. تیر نازک بوده و با استفاده از تئوری اوپلر-برنولی مدل‌سازی می‌شود. شرایط تکیه‌گاهی به صورت گیردار-الاستیک در نظر گرفته شده است. مشخصات فیزیکی و هندسی تیر به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \text{Length} &= 1\text{m}, \text{Width} = 60\text{mm}, \\ \text{Height} &= 40\text{mm}, E = 70\text{GPa}, \\ \rho &= 2700\text{ kg/m}^3, \bar{K}_T = 5 \end{aligned}$$



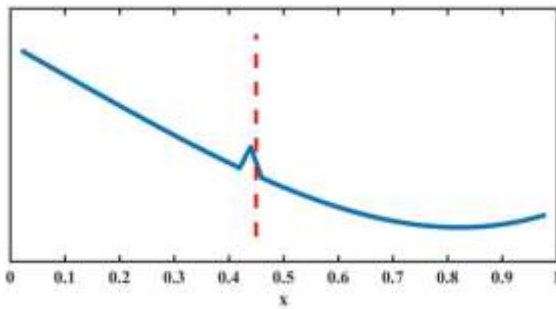
شکل ۲. تیر نازک با تکیه‌گاه گیردار-الاستیک.

که  $\bar{K}_T$  پارامتر بدون بعد مربوط به سختی فنری است که در تکیه‌گاه سمت راست قرار دارد و به شکل زیر تعریف شده است:

$$\bar{K}_T = \frac{k_T L^3}{EI} \quad (20)$$

پارامترهای مودال تیر تحت بررسی با استفاده از روش اجزای محدود استخراج می‌شوند. برای این کار از المان‌های تیر دوگره‌ای که در هر گره دو درجه آزادی خطی و چرخشی دارند استفاده می‌شود. پس از اینکه تیر به وسیله المان‌های موردنظر گسسته‌سازی شد، ماتریس‌های جرم و سختی کل سازه استخراج شده و با حل مسئله مقادیر ویژه مربوطه، فرکانس‌های طبیعی و توابع شکل مود استخراج می‌شوند. کدنویسی مربوط به فرمول‌بندی اجزا محدود در

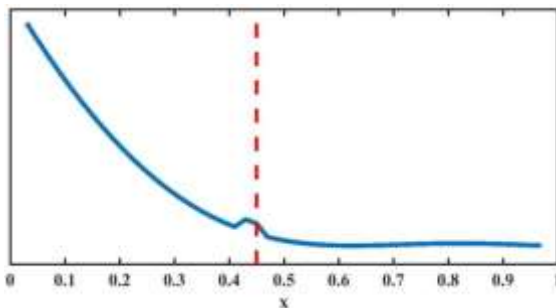
نکته نیز ضروری است که اطلاعات شکل مود در ۵۰



شکل ۳. تابع انحنای اولین شکل مود تیر ترک دار با ۵۰ نقطه اندازه‌گیری در طول تیر (خط چین محل ترک و محور افقی طول تیر و واحد آن متر می‌باشد).

نقطه با فاصله مساوی از یکدیگر در طول تیر ثبت شده است.

در شکل ۳ تابع انحنای شکل مود با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده و نمایش داده شده است، همان‌گونه که دیده می‌شود یک بی‌نظمی به شکل قله در حوالی محل ترک دیده می‌شود. محل ترک با یک خط عمودی نمایش داده شده است. از بی‌نظمی موجود یا محل قله نمی‌توان محل ترک را دقیقاً مشخص کرد. اما با تقریب خوبی می‌توان آن را تخمین زد. در شکل ۴ ابعاد فراکتال شکل مود محاسبه شده و نمایش داده شده است. مشابه تابع انحنای بی‌نظمی در حوالی

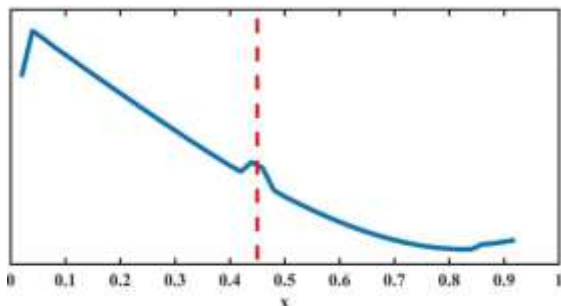


شکل ۴. ابعاد فراکتال اولین شکل مود تیر ترک دار با ۵۰ نقطه اندازه‌گیری در طول تیر (خط چین محل ترک و محور افقی طول تیر و واحد آن متر می‌باشد).

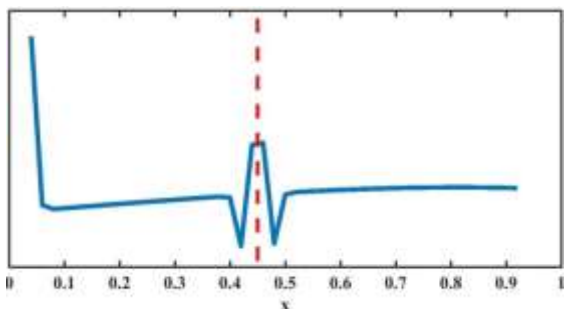
نرم‌افزار متلب<sup>۲۰</sup> پیاده شده و نتایج استخراج شده‌اند. ترک به عنوان آسیب محتمل در این تیر در نظر گرفته می‌شود. ترک به صورت یک لبه، عمود بر محور تیر و همواره باز فرض می‌شود. این نوع ترک در تیر در ادبیات فن به صورت یک فنر چرخشی بدون جرم مدل می‌شود که سختی آن با استفاده از روابط مکانیک شکست تعیین می‌شود، همچنین فرض می‌گردد مقادیر خیز تیر، نیروی برشی و ممان خمشی در مقطع ترک ثابت مانده و وقوع ترک سبب ناپیوستگی در شیب تیر می‌شود. برای پیاده‌سازی اثر ترک در کد اجزای محدود ایجاد شده از روابط معرفی شده در مرجع [۴۶] استفاده شده است که نهایتاً مقادیر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای تیر مورد بررسی پس از وقوع ترک قابل محاسبه می‌باشد.

برای ردیابی آسیب در این تیر از سه روش مختلف مبتنی بر شکل مود استفاده می‌شود. در روش اول تابع انحنای شکل مود محاسبه و بررسی می‌گردد. در روش دوم تبدیل موجک شکل مود مورد استفاده قرار می‌گیرد و در سومین روش از ابعاد فراکتال برای ردیابی آسیب استفاده می‌شود. برای تبدیل موجک از توابع موجک مادر متفاوتی می‌توان استفاده کرد اما با اتکا به نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف موجک‌های گاوسی مرتبه چهارم با علامت اختصاری "gaus4" و مورلت با علامت اختصاری "morl" مورد استفاده قرار می‌گیرند.

فرض می‌کنیم یک ترک در تیر وجود دارد. این ترک به عمق ۴ میلی‌متر در فاصله ۴۵۰ میلی‌متری نسبت به تکیه‌گاه گیردار واقع شده است. برای ردیابی آسیب از سه روش ذکر شده مبتنی بر تحلیل شکل مود استفاده می‌کنیم. تنها اولین شکل مود سازه برای تشخیص آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد، ذکر این



شکل ۸. تبدیل موجک اولین شکل مود تیر ترک دار با ۵۰ نقطه اندازه گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد) با استفاده از موجک مادر "morl" پس از حذف اثر لبه ها (خط چین محل ترک).

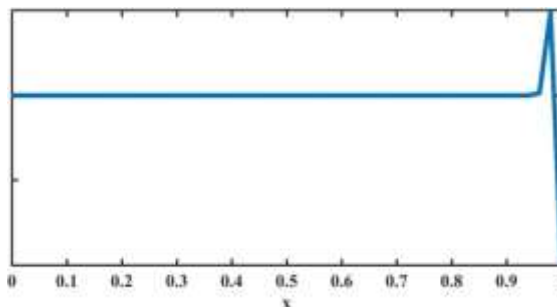


شکل ۷. تبدیل موجک اولین شکل مود تیر ترک دار با ۵۰ نقطه اندازه گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد) با استفاده از موجک مادر "gaus4" پس از حذف اثر لبه ها (خط چین محل ترک).

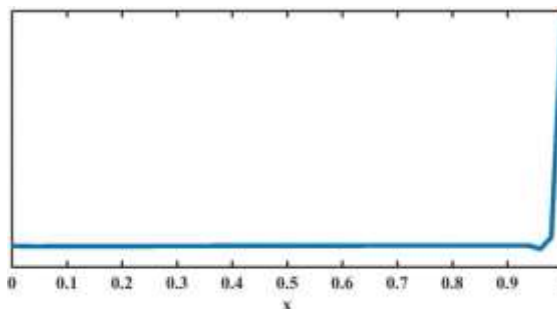
نمودار ضرایب موجک را مجدداً رسم می کنیم. در شکل های ۷ و ۸ ضرایب تبدیل موجک با حذف نقاط انتهایی به ترتیب برای موجک های مادر گاوسی مرتبه چهارم و مورلت رسم شده است. همان گونه که دیده می شود در حوالی محل ترک یک بی نظمی در

نمودار به وجود آمده است که شکل بی نظمی با توجه به نوع موجک مادر به کار رفته متفاوت می باشد. در تحلیل های انجام شده فرض بر این بود که اطلاعات شکل مود در ۵۰ نقطه اندازه گیری شده اند، اکنون فرض می کنیم تعداد نقاط کاهش یافته و اطلاعات شکل مود در ۱۰ نقطه با فاصله مساوی از یکدیگر در طول تیر ثبت شده اند. در شکل های ۹ تا ۱۲ به ترتیب نتایج تابع انحناء، ابعاد فراکتال، ضرایب تبدیل موجک

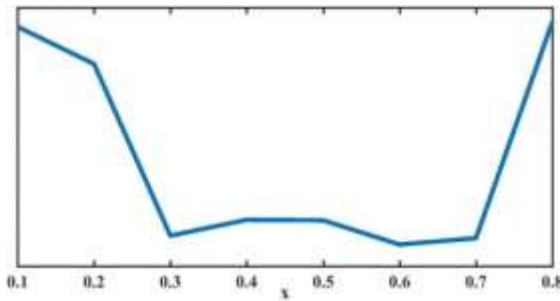
محل ترک دیده می شود که امکان تعیین محل دقیق ترک با استفاده از آن میسر نیست اما با تقریب خوبی می توان محل آن را تخمین زد. در شکل ۵ ضرایب تبدیل موجک با استفاده از موجک مادر گاوسی مرتبه چهارم و در شکل ۶ با استفاده از موجک مادر مورلت<sup>۲۱</sup> رسم شده اند. همان گونه که در هر دو تصویر دیده می شود در انتهای سمت راست تیر تغییرات زیادی در ضرایب موجک وجود دارد، این تغییرات به دلیل اثر لبه ها یا گوشه ها در ضرایب موجک رخ می دهد و ارتباطی به وجود بی نظمی در سیگنال اولیه ندارد. برای رفع این اثر از ضرایب موجک بدست آمده در چند نقطه ابتدایی و انتهایی صرف نظر می کنیم و



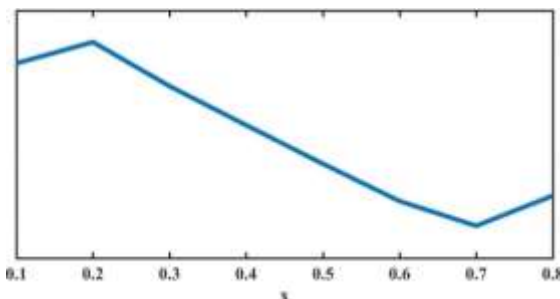
شکل ۵. تبدیل موجک اولین شکل مود تیر ترک دار با ۵۰ نقطه اندازه گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد) با استفاده از موجک مادر "gaus4".



شکل ۶. تبدیل موجک اولین شکل مود تیر ترک دار با ۵۰ نقطه اندازه گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد) با استفاده از موجک مادر "morl".



شکل ۱۱. تبدیل موجک اولین شکل مود تیر ترک‌دار با ۱۰ نقطه اندازه‌گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد) با استفاده از موجک مادر "gaus4".



شکل ۱۲. تبدیل موجک اولین شکل مود تیر ترک‌دار با ۱۰ نقطه اندازه‌گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد) با استفاده از موجک مادر "mor1".

## ۷-۲. مثال دوم: ساختمان پنج طبقه

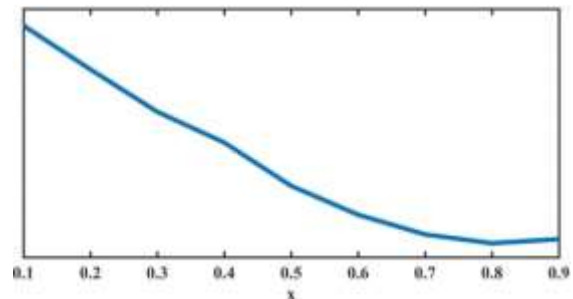
مدل گسسته یک ساختمان پنج طبقه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. در این نوع مدل‌سازی هر طبقه با یک جرم معادل‌سازی شده و اثرات سفتی سازه به صورت فنرهای خطی بین جرم‌ها اعمال شده است. مدل گسسته را می‌توان معادل پنج جرم که با فنرهای خطی به یکدیگر متصل شده‌اند، در نظر گرفت. مشخصات جرم‌ها و فنرها به صورت زیر می‌باشد:

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 1000\text{kg}$$

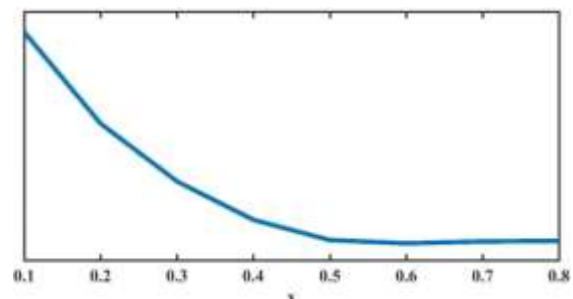
$$k_1 = k_2 = k_3 = 2k_4 = 4k_5 = 10^5 \text{ N/m}$$

با موجک مادر گاوسی مرتبه ۴ و موجک مادر مورلت به ترتیب ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود بجز شکل ۱۱ در باقی حالات نمی‌توان به وقوع آسیب در سازه پی برد. در شکل مربوط به ضرایب تبدیل موجک با موجک مادر گاوسی مرتبه ۴ بعد از حذف اثر لبه‌ها می‌توان تغییرات ایجاد شده

در میانه نمودار را ناشی از وجود آسیب دانست ولی نمی‌توان تقریب مناسبی از محل آن بدست آورد. همان‌گونه که در این مثال دیده شد دقت روش‌های پردازش سیگنال اعم از سنتی مانند تابع انحنای و مدرن مانند موجک و تابع فراکتال به تعداد نقاط اندازه‌گیری شده بستگی دارد و با افزایش این نقاط دقت افزایش می‌یابد.

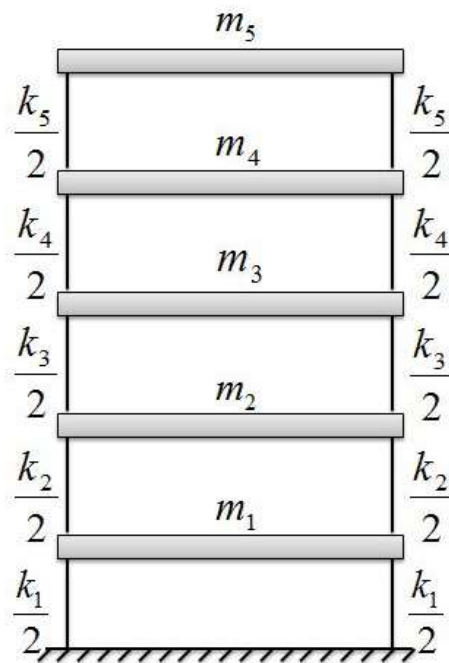


شکل ۹. تابع انحنای اولین شکل مود تیر ترک‌دار با ۱۰ نقطه اندازه‌گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد).



شکل ۱۰. ابعاد فراکتال اولین شکل مود تیر ترک‌دار با ۱۰ نقطه اندازه‌گیری در طول تیر (واحد محور افقی متر می باشد).

در این مدل امکان اندازه‌گیری شکل مود با توجه به درجات آزادی سازه فقط در پنج نقطه میسر می‌باشد که با توجه به مثال تیر اوپلر- برنولی که در مثال اول ارائه شد، امکان انجام تحلیل روی شکل مود برای تعیین آسیب وجود ندارد. در نتیجه برای ردیابی آسیب از روش‌های معکوس استفاده می‌کنیم. برای استفاده از روش معکوس به یک الگوریتم بهینه‌سازی نیاز داریم که بتواند با دقت و سرعت مناسبی در محدوده متغیرهای مجهول به جستجو پرداخته و بدون محصور شدن در اکسترمم‌های محلی، اکسترمم مطلق در آن محدوده را پیدا کند. روش‌های متعددی برای نیل به این موضوع نظیر الگوریتم ژنتیک، ازدحام



شکل ۱۳. مدل گسسته سازه ۵ طبقه.

ذرات، رقابت استعماری و ... ارائه شده است که در مساله حاضر از روش بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش استفاده می‌گردد، جزئیات این روش در مراجع [۴۷] ارائه شده و از شرح آن صرف‌نظر می‌شود. ذکر این

نکته ضروری است که روش بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری و آموزش به دنبال جواب‌هایی می‌گردد که تابع هدف را بیشینه می‌کند؛ بنابراین در مسائلی که هدف کمینه‌سازی یک تابع است باید با انجام اصلاحاتی روی تابع نظیر معکوس کردن، مساله از کمینه‌سازی به بیشینه‌سازی تبدیل شود تا بتوان از روش ذکر شده استفاده کرد.

برای ردیابی آسیب چهار تابع هدف در نظر گرفته می‌شود، اولین تابع هدف تنها از فرکانس‌های طبیعی استفاده می‌کند که در رابطه ۱۰ ارائه شده است. دومین تابع هدف فقط از توابع شکل مود استفاده می‌کند که در رابطه ۱۱ ارائه شده است. سومین تابع هدف از ترکیب اطلاعات فرکانس‌های طبیعی و شکل مود استفاده می‌کند که در رابطه ۱۳ ارائه شده است. نهایتاً چهارمین تابع هدف از ترکیب اطلاعات فرکانس‌های طبیعی و شکل مود در قالب سطح بار یکنواخت استفاده می‌کند که در رابطه ۱۹ ارائه شده است.

ابتدا با فرض اینکه هیچ‌گونه نویز یا اغتشاش در اطلاعات اندازه‌گیری شده وجود ندارد، به مقایسه توابع هدف مختلف می‌پردازیم. اولین موضوع در مقایسه توابع هدف بررسی سرعت همگرایی آن‌ها می‌باشد. ۱۵ حالت مختلف برای وقوع آسیب در نظر می‌گیریم، بدین صورت که فرض می‌کنیم آسیب هر بار در یکی از طبقات سازه مورد بررسی رخ داده است. برای هر طبقه نیز سه شدت آسیب برابر با کاهش ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ سفتی در نظر گرفته می‌شود. برای هر حالت آسیب، الگوریتم جستجو پنج بار برای هر تابع هدف اجرا می‌شود و حداقل تکرار برای همگرا شدن جواب ثبت می‌گردد. دو مقداری که به ازای

بنابراین برای ردیابی آسیب در حالتی که در اطلاعات ثبت شده نویز وجود دارد، از این دو تابع هدف استفاده می‌کنیم. اثر نویز در فرکانس‌های طبیعی به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$\omega_i^{\text{Noise}} = \omega_i(1 + \text{NL} \times \text{Rndn}) \quad (21)$$

در رابطه ۲۱،  $\omega_i^{\text{Noise}}$  و  $\omega_i$  به ترتیب فرکانس طبیعی  $i$ ام با و بدون نویز هستند. NL سطح یا شدت نویز و Rndn یک عدد تصادفی بین -۱ و ۱ می‌باشند. در مورد شکل مود از رابطه پیشنهاد شده در مرجع [۴۸] برای اعمال اثر نویز به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\phi_i^{\text{Noise}} = \phi_i(1 + \text{NV}), \quad (22)$$

$$\text{NV} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{e^{\text{SNR} \times \frac{\ln 10}{10}}} \times \text{RV}}$$

در رابطه ۲۲،  $\phi_i^{\text{Noise}}$  و  $\phi_i$  به ترتیب شکل مود  $i$ ام با و بدون نویز هستند.  $\sigma^2$  واریانس شکل مود بدون نویز، SNR نسبت سیگنال به نویز و RV یک بردار با مولفه‌های تصادفی بین -۱ و ۱ است که میانگین آن صفر می‌باشد. در حالت وجود نویز در پارامترهای مودال اندازه‌گیری شده، دو سناریو برای وجود آسیب در نظر می‌گیریم که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

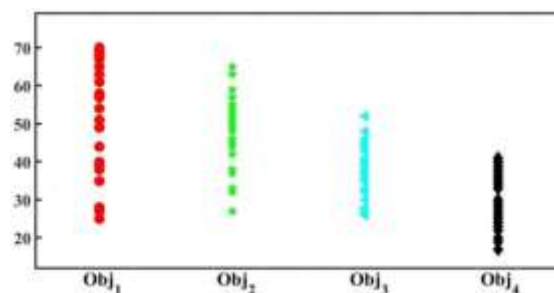
مقادیر پارامترهای مرتبط با شدت نویز در فرکانس‌های طبیعی و توابع شکل مود که در روابط ۲۱ و ۲۲ معرفی شدند، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\text{NL} = 5\%, \text{SNR} = 50$$

جدول ۱. دو سناریو وقوع آسیب در سازه ۵ طبقه

سناریو آسیب ۱		سناریو آسیب ۲	
شماره المان	شدت آسیب	شماره المان	شدت آسیب
۲	۱۰٪	۱	۱۰٪
		۴	۱۰٪

آن‌ها تابع هدف سریع‌تر به جواب همگرا می‌شود به عنوان سرعت آن تابع هدف برای آن حالت خاص آسیب در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت با توجه به اینکه ۱۵ حالت آسیب مفروض بوده است، ۳۰ داده برای بیان سرعت هر تابع هدف برای حالات مختلف آسیب بدست می‌آید. در شکل ۱۴ حداقل تعداد تکرار هر تابع هدف برای همگرا شدن به جواب نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود اولین و دومین توابع هدف که به ترتیب فقط از فرکانس‌های طبیعی و شکل مود برای ردیابی آسیب استفاده می‌کنند نسبت به سومین و چهارمین توابع هدف که از ترکیب اطلاعات فرکانس‌های طبیعی و شکل مود استفاده می‌کنند، به تعداد تکرار بیشتری برای ردیابی آسیب نیاز دارند. به بیان دیگر توابع هدف سوم و چهارم، سرعت بیشتری در ردیابی آسیب دارند. به طور میانگین اولین تابع هدف به ۵۵ تکرار، دومین تابع هدف به ۴۸ تکرار، سومین تابع هدف به ۳۷ تکرار و چهارمین تابع هدف به ۳۰ تکرار برای همگرا شدن به پاسخ نیاز دارند.

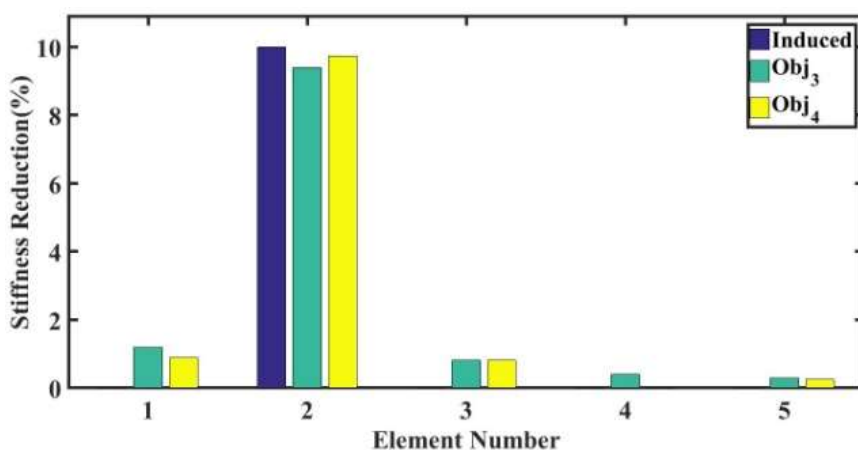


شکل ۱۴. مقایسه حداقل تعداد تکرار الگوریتم برای همگرایی توابع هدف مختلف برای ۱۵ حالت آسیب.

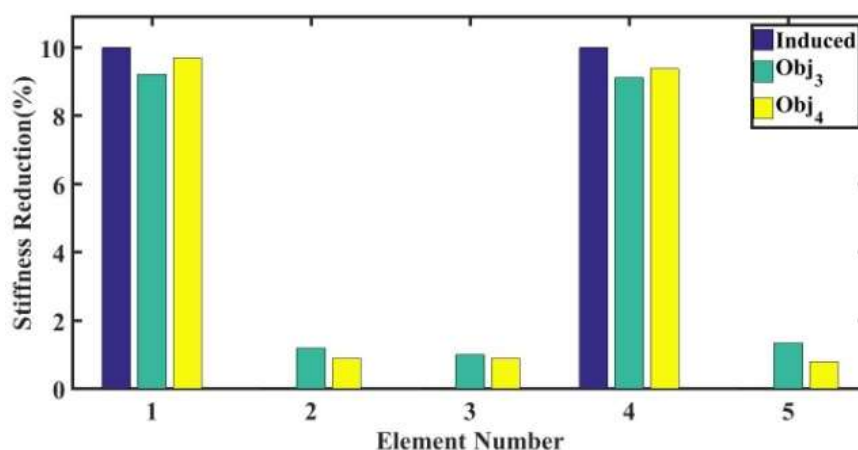
همان‌گونه که دیده شد سومین و چهارمین تابع که از ترکیب اطلاعات فرکانس‌های طبیعی و شکل مود استفاده می‌کنند، سرعت همگرایی بیشتری دارند،

اطلاعات سه فرکانس طبیعی اول و سه شکل مود اول برای ردیابی آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرایند ردیابی به صورت به روزرسانی مدل سازه دنبال می‌شود، بدین صورت که برای هر المان یک سفتی در نظر گرفته شده که مقدار آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و تابع هدف تعیین می‌شود. نهایتاً آسیب در هر المان از تفاوت مقدار سفتی به دست آمده از الگوریتم و مقدار سفتی اولیه به صورت درصدی تعیین می‌گردد. چنانچه مقدار آسیب از  $0/2\%$  کمتر

باشد آن المان کاملاً سالم در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم برای ردیابی آسیب در شکل ۱۵ برای سناریو آسیب ۱ و در شکل ۱۶ برای سناریو آسیب ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود تابع هدف شماره ۴ که از ترکیب اطلاعات فرکانس‌های طبیعی و شکل مود در قالب سطح بار یکنواخت استفاده می‌کند، دقت بیشتری در ردیابی آسیب دارد



شکل ۱۵. نتیجه ردیابی سناریو آسیب ۱ در سازه ۵ طبقه با وجود نویز.



شکل ۱۶. نتیجه ردیابی سناریو آسیب ۲ در سازه ۵ طبقه با وجود نویز.

## ۸. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به مرور، بررسی و مقایسه روش‌های ردیابی آسیب در سازه‌ها پرداخته شد. ابتدا اهمیت پایش وضعیت سازه‌ها بررسی شد، در یک دسته‌بندی کلی نشان داده شد که روش‌های پایش وضعیت سازه‌ها یا مبتنی بر مدل یا مبتنی بر پاسخ هستند که با توجه به اطلاعات موجود می‌توان نوع تحلیل را انتخاب کرد.

یکی از پارامترهای مودال برای ردیابی آسیب در سازه‌ها فرکانس طبیعی است که با توجه به تحقیقات پیشین، دارای نقاط قوت و ضعف زیر می‌باشد:

- سادگی اندازه‌گیری
- حساسیت کم به نویز
- حساس نبودن به آسیب‌های با شدت کم
- نیاز به مدل‌سازی دقیق عددی یا تحلیلی سازه برای تعیین محل یا شدت آسیب
- پارامتر مودال دیگر برای ردیابی آسیب در سازه شکل مود است که تحقیقات پیشین منجر به استخراج نقاط قوت و ضعف زیر برای آن شده است:
- حساسیت بیشتر به وقوع آسیب
- تعیین محل آسیب بدون نیاز به مدل‌سازی عددی یا تحلیلی سازه
- حساسیت به نویز
- نیاز به حسگر زیاد برای اندازه‌گیری

چنانچه هدف استفاده از روش مبتنی بر پاسخ برای ردیابی آسیب با استفاده از شکل مود باشد، ارتباط نزدیکی بین حوزه پایش وضعیت و پردازش سیگنال برقرار می‌شود تا با تحلیل شکل مود به عنوان یک سیگنال، بی‌نظمی‌ها و نقاط تکین ناشی از آسیب از

سایر عوامل متمایز شده و آسیب شناسایی شود. در ادامه در قالب دو مثال عددی روش‌های مختلف ردیابی آسیب مقایسه و بررسی شدند. در مثال اول برای مقایسه روش‌های مبتنی بر پاسخ، یک تیر اوپلر-برنولی با شرایط تکیه‌گاهی الاستیک مورد بررسی قرار گرفت. شکل مود تیر با استفاده از روش‌های تابع انحناء، ابعاد فراکتال و تبدیل موجک (با دو موجک مادر متفاوت) تحلیل شد. اگرچه در برخی جزئیات نظیر میزان حساسیت به شدت آسیب یا اثر لبه‌ها، تفاوت‌هایی بین این روش‌ها وجود داشت اما در اینکه هر سه روش به شدت وابسته به حجم اطلاعات شکل مود هستند، تفاوتی وجود ندارد. نتایج نشان می‌داد چنانچه اطلاعات شکل مود در طول تیر با تراکم مناسبی ثبت شده باشد، هر سه روش قادر به تعیین محل آسیب با دقت مناسبی هستند اما چنانچه تراکم اطلاعات کم باشد، هیچ یک از روش‌ها قادر به تعیین محل آسیب نیستند. در مثال دوم برای مقایسه روش‌های مبتنی بر پاسخ با استفاده از روش معکوس، مدل گسسته یک ساختمان ۵ طبقه مورد بررسی قرار گرفت. چهار تابع هدف مختلف با استفاده از فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها انتخاب شده و برای ردیابی آسیب به کار رفتند. نتایج نشان می‌داد ترکیب اطلاعات فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها در قالب مفهوم سطح بار یکنواخت مؤثرترین روش برای استفاده در روش‌های معکوس در ردیابی آسیب می‌باشد.

- [1] Fan, Wei, and Pizhong Qiao. "Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study." *Structural health monitoring* 10, no. 1 (2011): 83-111.
- [2] Cawley, Peter. "Structural health monitoring: Closing the gap between research and industrial deployment." *Structural Health Monitoring* 17, no. 5 (2018): 1225-1244.
- [3] Carden, E. Peter, and Paul Fanning. "Vibration based condition monitoring: a review." *Structural Health Monitoring* 3, no. 4 (2004): 355-377.
- [4] Rezvani, Kamal, Maia NMM, and Mohammad H. Sabour. "A comparison of some methods for structural damage detection." *Scientia Iranica* 25.3 (2018): 1312-1322.
- [5] Meruane, V., and W. Heylen. "An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties." *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, no. 5 (2011): 1559-1573.
- [6] Das, Swagato, Purna Saha, and S. K. Patro. "Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review." *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 6 (2016): 477-507.
- [7] Dessi, Daniele, and Gabriele Camerlengo. "Damage identification techniques via modal curvature analysis: Overview and comparison." *Mechanical Systems and Signal Processing* 52 (2015): 181-205.
- [8] Hou, Rongrong, and Yong Xia. "Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures: 2010–2019." *Journal of Sound and Vibration* 491 (2021): 115741.
- [9] Gudmundson, Peter. "Eigenfrequency changes of structures due to cracks, notches or other geometrical changes." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 30.5 (1982): 339-353.
- [10] Liang, Robert Y., Jialou Hu, and Fred Choy. "Theoretical study of crack-induced eigenfrequency changes on beam structures." *Journal of Engineering Mechanics* 118.2 (1992): 384-396.
- [11] Adams, Robert D., et al. "A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures." *Journal of Mechanical Engineering Science* 20.2 (1978): 93-100.
- [12] Messina, Arcangelo, E. J. Williams, and T. Contursi. "Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method." *Journal of Sound and Vibration* 216.5 (1998): 791-808.
- [13] Liang, Robert Y., Fred K. Choy, and Jialou Hu. "Detection of cracks in beam structures using measurements of natural frequencies." *Journal of the Franklin Institute* 328.4 (1991): 505-518.
- [14] Patil, D. P., and S. K. Maiti. "Detection of multiple cracks using frequency measurements." *Engineering Fracture Mechanics* 70.12 (2003): 1553-1572.
- [15] Murigendrappa, S. M., S. K. Maiti, and H. R. Srirangarajan. "Experimental and theoretical study on crack detection in pipes filled with fluid." *Journal of Sound and Vibration* 270.4-5 (2004): 1013-1032.

- [16] Salawu, Olusegun S. "Detection of structural damage through changes in frequency: a review." *Engineering Structures* 19.9 (1997): 718-723.
- [17] Farrar, Charles Reed, and G. H. James Iii. "System identification from ambient vibration measurements on a bridge." *Journal of Sound and Vibration* 205.1 (1997): 1-18.
- [18] Hu, Chuanshuang, and Muhammad T. Afzal. "A statistical algorithm for comparing mode shapes of vibration testing before and after damage in timbers." *Journal of Wood Science* 52 (2006): 348-352.
- [19] Pawar, Prashant M., Kanchi Venkatesulu Reddy, and Ranjan Ganguli. "Damage detection in beams using spatial Fourier analysis and neural networks." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 18.4 (2007): 347-359.
- [20] Abdo, MA-B., and Muneo Hori. "A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes." *Journal of Sound and Vibration* 251.2 (2002): 227-239.
- [21] Pandey, A. K., M. Biswas, and M. M. Samman. "Damage detection from changes in curvature mode shapes." *Journal of Sound and Vibration* 145.2 (1991): 321-332.
- [22] Wahab, MM Abdel, and Guido De Roeck. "Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario." *Journal of Sound and Vibration* 226.2 (1999): 217-235.
- [23] Amaravadi, Venkata Kasi, et al. "Structural health monitoring using wavelet transforms." *Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems*. Vol. 4327. SPIE, 2001.
- [24] Kim, Hansang, and Hani Melhem. "Damage detection of structures by wavelet analysis." *Engineering structures* 26.3 (2004): 347-362.
- [۲۵] رضایی فر، ا.، قلهکی، م.، خان احمدی، م. و امیری، یاسر. "مروری بر پایش سلامت و تشخیص آسیب در سازه‌ها با استفاده از تبدیل موجک (با مطالعه موردی شناسایی آسیب در تیر طره)." *نشریه صوت و ارتعاش*، ۱۴۰۱، شماره ۲۱، دوره ۱۱، صفحه ۱۵۷-۱۷۱.
- [26] Lee, Eun-Taik, and Hee-Chang Eun. "Damage detection of steel beam using frequency response function measurement data and fractal dimension." *Journal of Vibration and Acoustics* 137.3 (2015): 034503.
- [27] Hadjileontiadis, L. J., E. Douka, and A. Trochidis. "Fractal dimension analysis for crack identification in beam structures." *Mechanical Systems and Signal Processing* 19.3 (2005): 659-674.
- [28] Katz, Michael J. "Fractals and the analysis of waveforms." *Computers in biology and medicine* 18.3 (1988): 145-156.
- [29] Moradi, S., P. Razi, and L. Fatahi. "On the application of bees algorithm to the problem of crack detection of beam-type structures." *Computers & Structures* 89.23-24 (2011): 2169-2175.

- [30] Nanda, Bharadwaj, Damodar Maity, and Dipak K. Maiti. "Crack assessment in frame structures using modal data and unified particle swarm optimization technique." *Advances in Structural Engineering* 17.5 (2014): 747-766.
- [31] Pandey, A. K., and M. Biswas. "Damage detection in structures using changes in flexibility." *Journal of sound and vibration* 169.1 (1994): 3-17.
- [32] Zhang, Z., and A. E. Aktan. "Application of modal flexibility and its derivatives in structural identification." *Journal of Research in Nondestructive Evaluation* 10.1 (1998): 43-61.
- [33] Wu, D., and S. S. Law. "Damage localization in plate structures from uniform load surface curvature." *Journal of Sound and Vibration* 276.1-2 (2004): 227-244.
- [34] Masoumi, M. A. S. O. U. D., and M. R. Ashory. "Damage identification from uniform load surface using continuous and stationary wavelet transforms." *Latin American Journal of solids and structures* 11 (2014): 738-754.
- [35] Mirzabeigy, Alborz, and Reza Madoliat. "An inverse approach based on uniform load surface for damage detection in structures." *Smart Structures and Systems* 24.2 (2019): 233-242.
- [36] Rahita, Aulia Chanief, et al. "Internet of Things (IoT) in Structural Health Monitoring: A Decade of Research Trends." *Instrumentation, Mesures, Métrologies* 23.2 (2024).
- [37] Mishra, Mayank, Paulo B. Lourenço, and Gunturi Venkata Ramana. "Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review." *Journal of Building Engineering* 48 (2022): 103954.
- [38] Avci, Onur, et al. "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 (2021): 107077.
- [39] Malekloo, Arman, et al. "Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights." *Structural Health Monitoring* 21.4 (2022): 1906-1955.
- [40] Danish, Aamar, Faran Tayyab, and Muhammad Usama Salim. "Health assessment based on dynamic characteristics of reinforced concrete beam using realtime wireless structural health monitoring sensor." *Journal of Structural Integrity and Maintenance* 5.3 (2020): 204-210.
- [41] Muttillio, Mirco, et al. "Structural health monitoring: An IoT sensor system for structural damage indicator evaluation." *Sensors* 20.17 (2020): 4908.
- [42] Huang, Minshui, et al. "Damage identification of steel bridge based on data augmentation and adaptive optimization neural network." *Structural Health Monitoring* 24.3 (2025): 1674-1699.
- [43] Teng, Shuai, et al. "Vibration-based structural damage detection using 1-D convolutional neural network and transfer learning." *Structural Health Monitoring* 22.4 (2023): 2888-2909.

- [44] Khatir, Abdelwahhab, et al. "A new hybrid PSO-YUKI for double cracks identification in CFRP cantilever beam." *Composite Structures* 311 (2023): 116803.
- [45] Zhou, Wei, and Y. F. Xu. "Damage identification for plate structures using physics-informed neural networks." *Mechanical Systems and Signal Processing* 209 (2024): 111111.
- [46] Khaji, N., and M. Mehrjoo. "Crack detection in a beam with an arbitrary number of transverse cracks using genetic algorithms." *Journal of Mechanical Science and Technology* 28.3 (2014): 823-836.
- [47] Rao, R. Venkata, Vimal J. Savsani, and D. P. Vakharia. "Teaching–learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large-scale problems." *Information sciences* 183.1 (2012): 1-15.
- [48] Nguyen, Khoa Viet. "Crack detection of a double-beam carrying a concentrated mass." *Mechanics Research Communications* 75 (2016): 20-28.

پی نوشت

- 
- <sup>1</sup> Non-Destructive Testing, NDT  
<sup>2</sup> Euler–Bernoulli Beam  
<sup>3</sup> Curvature  
<sup>4</sup> Wavelet Transform  
<sup>5</sup> Fractal Dimension  
<sup>6</sup> Katz  
<sup>7</sup> Euclidean Distance  
<sup>8</sup> Strain Energy  
<sup>9</sup> Modal Assurance Criterion, MAC  
<sup>10</sup> Uniform Load Surface  
<sup>11</sup> Internet of Things, IoT  
<sup>12</sup> Machine Learning, ML  
<sup>13</sup> Digital Twin  
<sup>14</sup> Real time  
<sup>15</sup> WiFi  
<sup>16</sup> Big data  
<sup>17</sup> Neural Network  
<sup>18</sup> Support Vector Machine, SVM  
<sup>19</sup> Auto encoder  
<sup>20</sup> MATLAB  
<sup>21</sup> Morlet