

Development of a two-stage Method Based on Optimization Algorithms and Smart Calculation Methods in Structural Damage Detection

Behrouz Safa

PhD Student, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

Asghar Rasouli*

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

Yahya Nasira

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

asrasouli@iauz.ac.ir

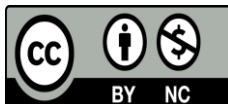
DOI 10.30495/CIVIL.2023.701860

Keywords:

Optimization algorithm, Smart calculation methods, Structural damage detection

Abstract

Among the countless methods that have been proposed in the field of structural damage detection, the finite element model updating method has been very popular. However, the accuracy and efficiency of this method decrease drastically when the number of variables in the problem increases, and this is a problem when dealing with large structures with a large number of elements. In this research, a two-step method is proposed, which is capable of reducing the size of the damage detection problem introduced to the updated model by identifying damaged structural members through a damage index based on static strain energy in the first step. Therefore, only a few variables are introduced to the second step, which include a process of updating the finite element model. This second step actually consists of an iterative process of updating the model, which uses a new and damage-sensitive objective function to detect the severity of damage in the elements identified in the previous step. Also, a meta-exploratory optimizer named equilibrium optimizer is utilized to determine the value of the unknown variables of the problem, which are the damage values of the elements introduced by the first step. The proposed method has also been tested on a number of numerical samples to check the effectiveness of the method in the presence of external disturbing factors such as measurement noise. A comparative study has been done to compare the results. According to the results, the proposed method is able to detect the location and severity of damage in different structures, and measurement noises and modal information only from the first few vibration modes do not have much impact on the accuracy of the results. A laboratory study has also been conducted to find out the efficiency and accuracy of the proposed method in real structures, and according to the results, the proposed method is well able to detect damage.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

توسعه روشی دو مرحله‌ای بر مبنای الگوریتم‌های بهینه‌یابی و روش‌های محاسباتی هوشمند در تشخیص خرابی سازه‌ها

بهروز صفا

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

اصغر رسولی*

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

یحیی نصیرا

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

asrasouli@iauz.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۹ فروردین ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۲۰ آذر ۱۴۰۱

چکیده

از میان روش‌های بی‌شماری که تا به حال در زمینه تشخیص آسیب سازه‌ها پیشنهاد شده‌اند، روش به‌روزرسانی مدل اجزای محدودی محبوبیت زیادی داشته است. با این وجود، دقت و کارایی این روش در صورت افزایش تعداد متغیرهای مسئله به شدت افت می‌کند و این در مواجهه با سازه‌های بزرگ با تعداد المان‌های زیاد، مسئله‌ساز است. در این پژوهش روشی دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌گردد که قادر است با شناسایی اعضای سازه‌ای آسیب دیده به کمک یک شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی استاتیکی در گام اول، سایر مسئله تشخیص آسیب مورد معرفی به مدل به‌روزشونده را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. بنابراین، تنها تعداد معدودی متغیر به گام دوم که شامل یک فرآیند به‌روزرسانی مدل اجزای محدودی است معرفی می‌شوند. این گام دوم در واقع متشکل از یک فرآیند تکراری به‌روزرسانی مدل است که از یک تابع هدف جدید و حساس به آسیب برای تشخیص شدت آسیب در المان‌هایی که در گام قبلی شناسایی شده بودند استفاده می‌کند. همچنین، از یک بهینه‌یاب فراکوشی به نام بهینه‌یاب تعادلی به منظور تعیین مقدار متغیرهای مجهول مسئله، که همان مقادیر آسیب‌دیدی المان‌های معرفی شده توسط گام اول هستند، استفاده می‌شود. روش پیشنهادی همچنین بر روی تعدادی نمونه عددی نیز تست شده است تا کارایی روش در حضور عوامل مزاحم خارجی مانند نویزهای اندازه‌گیری نیز بررسی گردد. یک مطالعه مقایسه‌ای برای قیاس نتایج انجام شده است. طبق نتایج، روش پیشنهادی قادر به تشخیص محل و شدت آسیب در سازه‌های مختلف است و نویزهای اندازه‌گیری و اطلاعات مودال فقط از چند مود ارتعاشی اول تاثیر چندانی بر دقت نتایج ندارند. یک مطالعه آزمایشگاهی نیز انجام شده است تا کارایی و دقت روش پیشنهادی در سازه‌های واقعی نیز دیده شود، که طبق نتایج آن، روش به خوبی قادر به تشخیص آسیب بوده است.

کلید واژگان: الگوریتم بهینه‌یابی، روش‌های محاسباتی هوشمند، تشخیص خرابی سازه

۱- مقدمه

قابل دسترس با شد [۸ و ۹]. بنابراین دانشمندان به معرفی روش‌های تشخیص آسیب ارتعاشی کلی پرداختند که می‌توانند حتی کوچک‌ترین آسیب‌ها را در پیچیده‌ترین سازه‌ها تشخیص دهند بدون این که محدودیت‌های روش‌های کلی را داشته باشند [۱۰]. مقالات مروری مختلفی بر روی روش‌های تشخیص آسیب ارتعاشی تاکنون انجام شده‌اند که برخی از آن‌ها را در مراجع [۱۱-۱۳] می‌توان یافت.

۲- تاریخچه مطالعات

پژوهش‌های متعددی از روش تشخیص آسیب ارتعاشی استفاده کرده‌اند، که در این بین روش‌های تشخیص آسیب مبتنی بر به‌روزرسانی مدل در دهه‌های اخیر بسیار محبوب و متداول بوده‌اند [۱۴-۱۵]. در این روش، یک مدل اجزای محدودی مینا از سازه ابتدا مدل می‌شود، و سپس مشخصه‌های مودال سازه در تکرارهای متوالی به‌روز می‌گردند تا مدل به‌طور کامل با سازه واقعی تطبیق داده شود [۱۶]. در واقع روش به‌روزرسانی مدل اجزای محدودی قادر است که مشخصات یک مدل اولیه از سازه را در تکرارهای مکرر با پارامترهای اندازه‌گیری شده از سازه واقعی تطبیق دهد [۱۵]. این روش مسئله تشخیص آسیب را به صورت یک مسئله معکوس فرموله می‌کند که در آن تابع هدفی تعریف می‌گردد تا تفاوت بین پارامترهای مدل و پارامترهای اندازه‌گیری شده را به حداقل برساند. در این فرآیند، مسئله کمینه‌سازی مذکور با کمک بهینه‌یاب‌های فراکوشی با سرعت بیشتری به جواب می‌رسد [۱۶]. مقالات مختلفی تا به حال در این مورد چاپ شده‌اند که اکثر آن‌ها تابع هدف خود را بر اساس مشخصه‌های مودال سازه تعریف نموده‌اند. از آنجایی که نام بردن همه این مقالات در این جا امکان‌پذیر نیست، برخی از جدیدترین مقالات در این زمینه در این بخش معرفی می‌گردند. برخی از محققان از فرکانس‌های طبیعی، شکل مدی، ماتریس نرمی، و یا ترکیبی از این‌ها برای تعریف نمودن تابع هدف خود استفاده کرده‌اند. استفاده از این پارامترها مزایای مختلفی دارد. به عنوان مثال، فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مدی سازه به سادگی از طریق اندازه‌گیری‌های دینامیکی ثبت شده توسط حسگرهایی که در نقاط مختلف روی سازه نصب می‌شوند، قابل محاسبه هستند، و نرمی مودال هم به سادگی با استفاده از همین دو پارامتر به دست می‌آید. به علاوه، وجود آسیب‌های سازه‌ای تغییرات قابل توجهی در این پارامترهای سازه ایجاد می‌کند و بنابراین بررسی چنین تغییراتی می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره وجود و میزان آسیب در سازه به دست دهد [۱۷]. در سال ۲۰۱۶، خطیر و همکاران روش تشخیص آسیب مبتنی بر به‌روزرسانی مدل را ارائه کردند که در آن از فرکانس طبیعی برای تعریف تابع هدف استفاده شده بود و مسئله تشخیص آسیب توسط الگوریتم بهینه‌یابی خفاش حل گردید [۱۸]. در مقاله آن‌ها، روش پیشنهادی بر روی چند مثال عددی تست شد و اثرات نویز اندازه‌گیری بررسی گردیدند. خو و همکاران از خطای پسماند فرکانس‌ها به عنوان پارامتر حساس به آسیب برای تشخیص خرابی در سازه کمک گرفتند [۱۹]. این محققان روش پیشنهادی خود را بر روی یک تیر دوسر سازه و همچنین یک خرپا تست

آیین‌نامه‌های ساختمانی متعددی امروزه وجود دارند تا به مهندسان کمک کنند سازه‌ها با در نظرگیری تمامی جزئیات و پیش‌بینی بارگذاری‌های مختلف طراحی و اجرا شوند. به همین جهت، هزینه‌های زیادی در این زمینه صرف بهترین طراحی و ساخت می‌گردند و همچنین زمان زیادی صرف چنین اموری می‌شود. بنابراین، نگهداری سازه‌ها پس از ساختشان اهمیت بسیار بیشتری نسبت به سالیان پیش دارد و به‌ویژه در رابطه با سازه‌های با اهمیت و بزرگ نظیر پل‌ها که با جان تعداد زیادی از انسان سروکار دارند، این مسئله بسیار حائز اهمیت است. ممکن است تصور شود اگر سازه‌ها به درستی طراحی و اجرا شوند نیازی به بررسی و نگهداری نیست و قاعدتاً هر سازه‌های باید بتوانند در طی عمر بهره‌برداری خود بدون مشکل دوام بیاورند. اما این تصور با در نظر داشتن انواع نقایص اجرایی ناشی از خطای انسانی و عوامل محیطی که ممکن است بسیار غیرقابل پیش‌بینی باشند و بر عملکرد مورد پیش‌بینی سازه تأثیر بسزایی بگذارند، چندان درست نیست و باید حتماً چنین احتمالاتی را در نظر داشت و مطابق آن، مرتب از چنین سازه‌هایی بازدید به عمل آورد.

آسیب سازه‌ای به هرگونه نقص در مشخصات فیزیکی سازه اطلاق می‌شود که ممکن است در اثر بارگذاری خارجی و یا شرایط محیطی ایجاد شده باشد. این تعریف برای نخستین بار در منابع توسط یو ارائه گردید که باور داشت سازه‌ها حتی بلافاصله پس از بهره‌برداری و حتی پیش از بارگذاری نیز ممکن است به دلیل طراحی یا اجرای ضعیف دچار آسیب باشند [۱]. محققان دیگری نظیر فرنگوپل بیان کردند که چنین آسیب‌هایی در سازه‌ها می‌توانند باعث اختلال در عملکرد عادی سازه در طی عمر بهره‌برداری شده و با در موارد شدیدتر، منجر به گسیختگی‌های ناگهانی گردند [۲]. آسیب سازه‌ای ضرورتاً یک گسیختگی کامل را نشان نمی‌دهد، بلکه ممکن است به شکل یک زوال تدریجی باشد که اگر به موقع شناسایی نشود، منجر به ضعف عملکرد و با نهایتاً گسیختگی پیش‌بینی نشده گردند. این امر دلیل اصلی ظهور علم پایش سلامت سازه (SHM) است که شامل راهبردهایی برای بازرسی بلندمدت سازه‌های عمرانی، هوافضا و مکانیک می‌باشد [۳-۵]. در واقع این علم شامل طیف وسیعی از روش‌های مختلف از شناسایی مشخصات سازه (که به شناسایی سازه معروف است) تا اندازه‌گیری عمر بهره‌برداری باقیمانده سازه‌های موجود می‌باشد [۶]. در این میان، تشخیص آسیب سازه‌ای که یکی از زیر شاخه‌های علم پایش سلامت سازه است، یکی از اصلی‌ترین گام‌های نگهداری سازه‌های موجود است به طوری که سازه بتواند بیشترین سرویس را در طی عمر مفید خود ارائه دهد. روش‌های تشخیص آسیب غیرمخرب را می‌توان به دو دسته موضعی و کلی تقسیم‌بندی کرد [۷]. روش‌های موضعی مانند روش اولتراسوند و روش ذرات مغناطیسی تنها قادر هستند که آسیب را به صورت موضعی شناسایی کنند و این مشروط به آن است که محل تقریبی ناحیه آسیب‌دیده در سازه هم از قبل تقریباً مشخص بوده و هم

کردند و در نهایت بر روی یک سازه آزمایشگاهی نیز آن را بررسی نمودند. لازم به ذکر است مسئله معکوس مربوطه در پژوهش آن‌ها به کمک الگوریتم فاخته حل شد. بعدها هوانگ و لو روش تشخیص آسیبی بر مبنای یک تابع هدف غیرخطی که بر اساس پاسخ‌های شتابی سازه تعریف شده بود معرفی نمودند [۲۰]. در تحقیق آن‌ها، از بهینه‌یاب بیگ-بگ-بیگ کرانچ استفاده شد. نکته قابل توجه در مورد پژوهش آن‌ها، بررسی شدت آسیب‌های نسبتاً بزرگ در مطالعه عددی مورد بررسی‌شان است، که البته در حضور نویزهای اندازه‌گیری صورت گرفته است. کاوه و دادرس از تابع هدفی مبتنی بر مشخصه‌های مودال سازه برای تشخیص آسیب استفاده کردند و از بهینه‌یاب تبادل حرارتی برای حل مسئله کمک گرفتند، و روش مذکور را بر روی چندین مثال عددی و مقایسه‌ای بررسی نمودند [۲۱]. در پژوهش دیگری که توسط دباغ و همکاران انجام شد، تابع هدفی به کمک فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مدی تعریف گردید تا مسئله تشخیص آسیب به کمک بهینه‌یاب رقابت استعماری حل شود [۲۲]. روش آن‌ها بر روی چندین سازه عددی تست شد و مشخص شد که نتایج در شرایطی که اندازه‌گیری‌ها آلوده به نویز هستند نیز همچنان دقت مناسبی داشتند. در ۲۰۱۰، چن و یو تابع هدفی به وسیله فرکانس طبیعی و شکل مدی برای شناسایی آسیب در سازه‌ها پیشنهاد نمودند [۲۳]. این محققان در مقاله مذکور یک الگوریتم بهینه‌یابی هیبریدی معرفی نمودند که ترکیبی از بهینه‌یاب شیر-مورچه و بهینه‌یاب ندرل-ماد بود. همچنین آن‌ها روش پیشنهادی شان را بر روی چند سازه عددی و یک نمونه آزمایشگاهی امتحان کردند. سو و همکاران در پژوهشی اخیر تابع هدف چند پارامتره‌ای معرفی نمودند که مبنای آن استفاده از فرکانس‌های طبیعی، شکل مدی، و نرمی مودال سازه بود [۲۴]. بهینه‌یاب مورد استفاده در تحقیق آن‌ها الگوریتم خفاش با الگوریتم جستجوی اصلاح شده بود و روش بر روی چند پل تیری و خرابایی بررسی شدند. در عین حال، نتایج حاصل با نتایج بهینه‌یاب‌های دیگر نیز مقایسه شدند تا کارایی بهینه‌یاب پیشنهادی آن‌ها بیشتر مشخص گردد.

در دسته دیگری از پژوهش‌های تشخیص آسیب مبتنی بر به‌روزرسانی مدل، از پارامتر انرژی کرنشی مودال برای فرموله کردن تابع هدف استفاده شده است و مقالات مروری مختلفی بر روی این پارامتر تا کنون انجام شده‌اند [۲۵ و ۲۶]. از مهم‌ترین مزایای استفاده از این پارامتر این است که به سادگی با استفاده از ماتریس سختی و شکل‌های مدی سازه قابل محاسبه است [۲۶]. همچنین، تنها با استفاده از اطلاعات چند مود اول می‌توان آن را محاسبه کرد که در شرایطی که اطلاعات تمامی مدها موجود نیست بسیار مفید است [۲۷ و ۲۸]. در این زمینه، چا و بویاکرتورک یک چارچوب چندهدفه برای تشخیص آسیب در سازه‌های فولادی سه بعدی معرفی نمودند که در آن انرژی کرنشی مودال در تعریف تابع هدف استفاده شده بود [۲۹]. این محققان برای حل مسئله بهینه‌یابی مورد نظر خود از الگوریتم ژنتیک هیبریدی استفاده کردند. کاوه و ذوالقدر از پارامتر انرژی کرنشی مودال برای معرفی تابع

هدف استفاده نموده و مسئله را به کمک بهینه‌یاب طناب‌کشی حل کردند [۳۰]. آن‌ها روش پیشنهادی خود را بر روی چند نمونه عددی تست نمودند. همچنین، هوانگ و همکاران از نرمی مودال و انرژی کرنشی مودال فرکانسی برای تشخیص آسیب استفاده کردند و مسئله را به کمک بهینه‌یاب شعله-پروانه حل کردند [۳۱]. آن‌ها همچنین روش خود را بر روی سه نمونه عددی و دو نمونه آزمایشگاهی تست کردند. اما در کنار مزایایی که این پارامتر ایجاد می‌کند، معایبی نیز دارد؛ مثلاً این که از تعداد مدهای کمی برای محاسبه آن استفاده می‌شود، در صورتی که اطلاعات این چند مدها اول دقت کافی نداشته باشند، دقت نتایج تشخیص آسیب تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۲۵]. برای غلبه بر این کاستی، محققان تلاش‌های تحقیقاتی مختلفی را تا کنون انجام داده‌اند چرا که مزایایی که این پارامتر ایجاد می‌کند بسیار بیشتر از معایب آن هستند. یکی از راه‌حالی که برای پوشاندن مشکلات این پارامتر ارائه شده، استفاده از روش‌های تشخیص آسیب دومرحله‌ای است، که در این زمینه روش‌های بسیار متنوعی تا کنون معرفی شده‌اند و در این‌جا فقط تعدادی از پژوهش‌هایی که روش انرژی کرنشی مودال را با به‌روزرسانی مدل ترکیب کرده‌اند معرفی می‌شوند. برای نمونه، وو-دوی و همکاران در ۲۰۱۶ پژوهشی را انجام دادند که در آن تشخیص آسیب در سازه‌های لمینت کامپوزیت به کمک روشی دو مرحله‌ای انجام می‌گرفت [۳۲]. در پژوهش آن‌ها، ابتدا از پارامتر انرژی کرنشی مودال برای تعیین محل اعضای آسیب‌دیده سازه استفاده می‌گردید و سپس در گام بعدی به کمک الگوریتم‌های بهینه‌یابی شدت آسیب در این المان‌ها تعیین می‌شد. در واقع گام دوم شامل یک فرآیند به‌روزرسانی مدل بود که تابع هدفی مبتنی بر شکل‌های مدی سازه تعریف شده بود. آن‌ها روش پیشنهادی خود را بر روی چند مثال عددی تست کردند و اثر نویز را نیز بر روی نتایج بررسی کردند. سیدپور و منتظر نیز روشی دومرحله‌ای برای تشخیص آسیب در خرپاها پیشنهاد کردند که در آن ابتدا تعدادی المان مشکوک به آسیب در گام اول به کمک یک شاخص بر مبنای ماتریس نرمی معرفی می‌شد [۳۳]. شاخص مذکور بر اساس تغییرات کرنش که با استفاده از ماتریس نرمی سازه محاسبه شده بود، تعریف گردید. در گام دوم در پژوهش این محققان تابع هدفی بر اساس شکل مدی تعریف شده و به کمک الگوریتم بهینه‌یابی تکامل دیفرانسیلی شدت آسیب در المان‌های مشکوک به آسیبی که در گام قبل معرفی شده بودند تعیین گردید. همچنین در سال ۲۰۲۱، فن روشی دومرحله‌ای برای تشخیص آسیب ارائه نمود که در گام اول ابتدا اعضای سازه‌ای مشکوک به آسیب با استفاده از شاخصی مبتنی بر انرژی کرنشی مودال تعیین شده و سپس در گام بعدی به کمک به‌روزرسانی مدل و بهینه‌یاب ناحیه اطمینان، شدت آسیب‌ها تعیین گردید [۳۴].

در این‌جا لازم به ذکر است که در بسیاری از مقالات تشخیص آسیب سازه‌ای، روش‌های دومرحله‌ای دیگری از ترکیب روش‌های مختلف معرفی شده‌اند؛ برای مثال عباس‌نیا و همکاران در سال ۲۰۱۶ روشی دومرحله‌ای با استفاده از روش تبدیل موجک و به‌روزرسانی مدل معرفی



نمودند [۳۵]. در روش آن‌ها، مکان اعضای آسیب دیده توسط تبدیل موجک معرفی شده و در گام دوم که یک فرآیند به‌روزرسانی مدل بود، شدت آسیب در المان‌های مذکور تعیین می‌گردد. همچنین میرزایی و همکاران در پژوهشی به معرفی یک روش تشخیص آسیب دومرحله‌ای پرداختند که در آن در گام اول تبدیل موجک تعدادی اعضای آسیب دیده را معرفی نموده و سپس در گام بعد به کمک بهینه‌یاب و به‌روزرسانی مدل، شدت آسیب در این اعضا تخمین زده می‌شد [۳۶]. برای نشان دادن کارایی روش در سازه‌های با اندازه بزرگ، این محققان روش پیشنهادی خود را بر روی خرپاهای بزرگ تست کردند. معرفی مقالات بیشتر در زمینه روش‌های دومرحله‌ای دیگر در این بخش غیرضروری است.

در مقاله حاضر، روشی دومرحله‌ای برای تشخیص آسیب پیشنهاد می‌شود که ترکیبی از روش به‌روزرسانی مدل و یک شاخص تشخیص آسیب است. روش به‌روزرسانی مدل به سبب سادگی در پیاده‌سازی عددی، تا کنون بسیار مطلوب محققان بوده است، اما در شرایطی که سازه بزرگ و پیچیده باشد و تعداد اعضای سازه‌ای زیاد باشند، دقت سرعت روش به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین در این پژوهش سعی می‌شود این مشکل تا حد زیادی رفع گردد. شاخص تشخیص آسیب پیشنهاد شده در پژوهش حاضر، مبتنی بر انرژی کرنشی استاتیکی است، که با این که پارامتری مفید برای تعیین مکان اعضای آسیب دیده در سازه‌ها است، اما قادر به تعیین شدت آسیب‌دیدگی نیست. بنابراین، با ترکیب این شاخص با روش به‌روزرسانی مدل، این مقاله سعی دارد علاوه بر بهره‌بردن از مزایای این دو روش، کاستی‌های آن‌ها را رفع نماید. به عبارت دیگر، ابتدا در گام اول شاخصی بر مبنای انرژی کرنشی استاتیکی تعریف می‌شود که به شدت به آسیب سازه‌ای حساس است. لازم به ذکر است که برای تعیین انرژی کرنشی استاتیکی، سازه باید تحت تحریک استاتیکی قرار بگیرد، که بسیار پیچیده و در واقع غیرعملی است. بنابراین در این مقاله برای محاسبه انرژی کرنشی استاتیکی از اطلاعات مودال استفاده می‌شود تا از پیچیدگی مذکور جلوگیری شود. در این گام تمامی اعضای سازه که مشکوک به آسیب هستند توسط شاخص مذکور معرفی می‌گردند. سپس این المان‌ها به گام بعدی، که به‌روزرسانی مدل است، معرفی می‌شوند تا شدت آسیب در آن‌ها تعیین گردد. به این ترتیب، به جای معرفی تعداد زیادی مجهول به مدل به‌روزشونده، تنها تعداد محدودی عضو سازه‌ای مشکوک معرفی می‌شوند و به این ترتیب، اولاً مشکل شاخص تشخیص آسیب که قادر به تعیین شدت آسیب در اعضا نیست حل می‌شود، و همچنین این ایراد روش به‌روزرسانی مدل که در مواجهه با تعداد مجهولات زیاد دچار مشکل است، رفع می‌گردد. نکته جالب توجه این است که اگر عضوی سالم به اشتباه توسط شاخص آسیب گام اول معرفی شده باشد، در گام دوم شدت آسیب در عضو مذکور صفر به دست می‌آید، که مزیت بسیار مهمی است. برای گام به‌روزرسانی مدل در این مقاله، تابع هدفی جدید

تعریف شده که مبتنی بر انرژی کرنش استاتیکی است و بهینه‌یاب پی‌شهادی در این پژوهش برای حل مسئله معکوس، بهینه‌یاب تعادلی است.

۳- روش تحقیق

روش پیشنهادی این پژوهش استفاده از رویکردی دو مرحله‌ای برای تشخیص آسیب در سازه‌ها است. این روش ترکیبی از روش به‌روزرسانی مدل اجزای محدودی و یک شاخص آسیب است. انتخاب این روش به دو دلیل بسیار مهم صورت گرفته است. یک، روش به‌روزرسانی مدل روشی کارآمد با پیاده‌سازی آسان است و در برخورد با سازه‌های بزرگ و پیچیده بسیار کند عمل می‌کند و کاربرد این روش را در سازه‌های واقعی دچار مشکل می‌سازد. دوم، این پژوهش استفاده از شاخصی مبتنی بر انرژی کرنش استاتیکی را پیشنهاد می‌کند. اما به کمک این شاخص نمی‌توان شدت آسیب دیدگی را تعیین کرد. بنابراین روشی که این پژوهش پیشنهاد می‌کند با ترکیب کردن این دو روش سعی دارد بر ایرادهای هر یک از آن‌ها غلبه کند و مزایای آن را به بهترین نحو در تشخیص آسیب به کار بگیرد.

۳-۱- تعیین مکان المان‌های آسیب‌دیده در گام اول

در این گام، شاخصی با استفاده از انرژی کرنشی استاتیکی که در این پژوهش SSE^2 نامیده می‌شود، تعریف می‌گردد. هدف این شاخص این است که المان‌هایی از سازه که مشکوک به آسیب هستند را شناسایی و معرفی نماید. این پارامتر به این دلیل انتخاب شده است که حساسیت مناسبی به آسیب در سازه دارد و همچنین به سادگی محاسبه می‌گردد. کرنش استاتیکی از طریق اطلاعات مودال محاسبه می‌گردد. گام نخست برای محاسبه این پارامتر معادله جابجایی استاتیکی سازه است که در فرمول ۱ ارائه شده:

$$\mathbf{U} = \mathbf{F}_m \times \mathbf{f}_u \quad (1)$$

که در این معادله، \mathbf{f}_u بار استاتیکی واحد وارد شده بر تمام درجات آزادی سازه است. همچنین، \mathbf{F}_m ماتریس نرمی مودال است که می‌توان آن را به کمک m مود اول سازه به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\mathbf{F}_m = \Phi_m \frac{1}{\omega_m^2} \Phi_m \quad (2)$$

که در آن ω ماتریس فرکانسی قطری با استفاده از m مود اول است، Φ_m ماتریس شکل مودی با استفاده از همین تعداد مود است. در اینجا، انرژی کرنش استاتیکی سازه که SSE نام دارد، با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌گردد:

$$SSE_e = \frac{1}{2} \mathbf{U}'_e \mathbf{K}_e \mathbf{U}_e \quad (3)$$

در این فرمول، \mathbf{U}_e ماتریس جابجایی‌های استاتیکی المان e است، و \mathbf{K}_e ماتریس سختی مربوط به این المان می‌باشد. به سبب ساده‌سازی و راحتی محاسبات، SSE_e نسبت به Λ که ریشه دوم جمع مربعات

² Static strain energy

حال حساسیت به نویزهای اندازه‌گیری نداشته با شند برای تعریف تابع هدف بسیار مناسب است. تابع هدف در واقع میزان انطباق بین پارامترهای عددی و تجربی را اندازه می‌گیرد، که در نتیجه این کار، مجهولات مسئله بدست می‌آیند. در این راستا، تابع هدف جدیدی به نام Ob که در معادله ۷ ارائه شده، در این پژوهش برای نخستین بار در مقالات تعریف شده که از پارامتر MSSE به عنوان پارامتر حساس به آسیب استفاده می‌نماید.

$$Ob = \left| \frac{\sqrt{1 - MAC_{MSSE}}}{1 + MAC_{MSSE}} \right| \quad (7)$$

که در اینجا MSSE به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$MSSE = \frac{SSE_e}{TSSE} \quad (8)$$

به طوری که:

$$TSSE = \sqrt{\sum SSE_e^2} \quad (9)$$

معادله ۷، پارامتر MAC معیار تضمین مودی^۴ است که یک تابع سنجش همبستگی متداول است که برای اندازه‌گیری میزان انطباق بین پارامترهای مودال تابع هدف در مسائل مختلف از آن استفاده می‌شود.

$$MAC_{MSSE} = \frac{\left\{ MSSE_i^d \right\}^T \left\{ MSSE_i^h \right\}}{\left(\left\{ MSSE_i^d \right\}^T \left\{ MSSE_i^d \right\} \right) \left(\left\{ MSSE_i^h \right\}^T \left\{ MSSE_i^h \right\} \right)} \quad (10)$$

معیار تضمین مودی در واقع مقیاسی برای اندازه‌گیری درجه‌ی خطی بودن بین دو بردار است که در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MAC_j = \frac{\left| \left\{ x_j \right\}^T \left\{ x_j^* \right\} \right|^2}{\left(\left\{ x_j \right\}^T \left\{ x_j \right\} \right) \left(\left\{ x_j^* \right\}^T \left\{ x_j^* \right\} \right)} \quad (11)$$

که در آن $\left\{ x_j \right\}$ و $\left\{ x_j^* \right\}$ به ترتیب، بردارهای عددی و تجربی هستند [۳۷]. در مسائل تشخیص آسیب، چون همواره با دو سری داده سروکار داریم، استفاده از این رابطه منطقی و مناسب به نظر می‌رسد زیرا به کمک آن می‌توان میزان همبستگی بین دو سری داده‌ی تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده مدل را تعیین نمود. داده‌های تجربی از اندازه‌گیری پاسخ سازه به دست می‌آیند و داده‌های عددی، پیش‌بینی‌های مدل عددی هستند که مقادیر آسیب‌دیدگی در آن‌ها، پارامترهای مجهولی هستند که باید به کمک بهینه‌یاب تعیین شوند. اگر مقدار MAC بین دو سری داده، صفر شود، نشان‌دهنده این است که بین آن‌ها همبستگی وجود ندارد؛ و در صورتی که MAC برابر با یک شود، همبستگی کامل دو سری داده را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲- نوین اندازه‌گیری و روش اعمال آن در مدل

به هر نوسان و تغییر غیر عمدی که بر روی سیگنال‌های اندازه‌گیری ظاهر می‌شود، نویز می‌گویند و هر کمیتی که اندازه‌گیری و برداشت می‌شود، امکان آلوده شدن به نویز را دارد. در بیشتر مسائل تشخیص آسیب،

جابجایی‌های استاتیکی همه المان‌هاست، نرمالیزه می‌گردد. بنابراین، انرژی کرنش استاتیکی نرمال شده المان e با $NSSE_e$ نشان داده می‌شود و عبارت است از:

$$NSSE_e = \frac{SSE_e}{\Lambda} \quad (4)$$

که در آن:

$$\Lambda = \sqrt{\sum U^2} \quad (5)$$

نهایت، شاخص تشخیص آسیبی به نام SSEBI بر مبنای پارامترهای مذکور در بالا تعریف می‌شود تا مکان المان‌های آسیب دیده در سازه مشخص گردد. اگر مقدار SSEBI برای یک المان بیش از 0.1 به دست بیاید، این المان باید مشکوک به آسیب در نظر گرفته شود. بنابراین:

$$SSEBI = \frac{NSSE_e^d - NSSE_e^h}{NSSE_e^h} \quad (6)$$

در این معادله، از آنجایی که مکان المان‌های آسیب دیده از قبل معلوم نیست، از ماتریس سختی المانی سازه سالم برای تخمین مقدار $NSSE_e^d$ استفاده می‌شود.

۳-۲- تعیین شدت آسیب در المان‌های آسیب‌دیده در گام

دوم

حال که تمام المان‌های مشکوک به آسیب توسط گام قبل معرفی شده‌اند، در این گام نوبت به تعیین شدت میزان آسیب دیدگی در این المان‌ها است. تا این مرحله، تعداد متغیرهای معرفی شده به این گام دوم، به طور چشمگیری کاهش یافته‌اند چرا که به جای در نظر گرفتن همه المان‌های سازه، کافی است تنها چند المان مشکوک به آسیب که در گام پیش شناسایی شدند به مدل معرفی شود. این گام، متشکل از یک فرآیند به‌روزرسانی مدل اجزای محدودی است. ایده اصلی تشخیص آسیب با کمک این روش این است که تشخیص آسیب به صورت یک مسئله معکوس تعریف می‌شود که در آن مجهولات اصلی مسئله شدت آسیب در المان‌های معرفی شده هستند. به‌روزرسانی مدل، یک فرآیند حل مسئله تکرارشونده^۳ است. ابتدا لازم است تابع هدفی تعریف و فرموله شود و سپس مسئله به کمک یک الگوریتم بهینه‌یابی فراکوشی حل شود تا در نهایت شدت آسیب در این المان‌ها محاسبه گردد. این احتمال وجود دارد که در گام پیش، برخی المان‌ها به اشتباه آسیب دیده معرفی شده باشند و در واقع سالم بوده باشند. در این گام چنین المان‌هایی، شدت آسیب صفر به دست می‌آید، بنابراین خطای محاسبات گام پیش نیز کاهش می‌یابد.

۳-۲-۱- تابع هدف

همانطور که در فوق اشاره شد، تعریف یک تابع هدف متناسب با مسئله، کلید اصلی روش به‌روزرسانی مدل است. برای مسائل تشخیص آسیب، انتخاب پارامترهایی که به اندازه کافی حساس به آسیب باشند و در عین

⁴ Modal assurance criterion

³ Iterative

همانطور که مشاهده می‌گردد، F یک عبارت نمایی است که تعادل بین فرآیندهای جستجوی اکتشافی و بهره‌برداری را برقرار می‌نماید. معادله ۱۷ شامل سه عبارت برای به‌روزرسانی فرآیند اعمالی به هر ذره است. مشابه سایر بهینه‌یاب‌های تکاملی، EO با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود که تمرکز اولیه ذرات نام دارد. N_{PC} تعداد ذرات را نشان می‌دهد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{initial} = C_{min} + rand_i (C_{max} - C_{min}) \quad (18)$$

که در آن $C_{initial}$ تمرکز اولیه ذرات است و C_{min} و C_{max} به ترتیب مقادیر ماکزیمم و مینیمم ابعاد هستند. در واقع C_{min} یک بردار راندوم بین ۰ و ۱ است. پس از تشکیل جمعیت اولیه، ذرات به صورت تکراری به‌روز می‌شوند و این کار مطابق با جواب متناظر با آن‌ها که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد، صورت گرفته و سپس به عنوان جواب‌های بهینه-تاکنون ذخیره می‌شوند:

$$X_{new} = X_{eq} + \frac{G}{\mu}(1-F) + (X - X_{eq}) \cdot F \quad (19)$$

که در آن X و X_{new} بردار جواب اخیر و جدید مربوط به هر ذره هستند و X_{eq} بردار تمرکز رندوم است که به طور رندوم از فضای تعادل انتخاب شده است. μ برداری رندوم بین ۰ و ۱ است و F عبارت نمایی مطابق زیر است:

$$F = a_1 \text{sign}(m_1 - 0.5) (e^{-\lambda(1-\frac{T}{T_{max}})^{2\theta}} - 1) \quad (20)$$

که در آن a_1 و a_2 ثابت‌های کنترلی دو نوع جستجویی هستند که پیشتر به آن اشاره شد. همچنین $\text{sign}(m_1 - 0.5)$ جهت این جستجوها را تعیین می‌نماید. m_1 برداری رندوم بین ۰ و ۱ است. G نرخ تشکیل نام دارد و به شکل زیر است:

$$G = \begin{cases} 0.5r_1(X_{eq} - X) \cdot F & \text{if } r_2 \geq GP \\ 0 & \text{if } r_2 < GP \end{cases} \quad (21)$$

در این معادله در واقع GP احتمال تشکیل است و r_1 و r_2 بردارهای رندوم بین ۰ و ۱ هستند. هر تکرار شامل محاسبه تابع هدف به ازای هر ذره است و پس از آن فضای تعادل مجدداً به جواب‌های بهینه-تاکنون به‌روز می‌شود.

۵- نتایج تحلیل

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، چندین مثال عددی بررسی می‌شوند. سطح‌های مختلف از نویز نیز در مدل‌ها اعمال شده تا کارایی روش در شرایط واقعی نیز مشخص شود. کلیه نمونه‌های این بخش با استفاده از اطلاعات مودی از تعداد محدودی از مودهای اول سازه بررسی شده‌اند تا توانایی روش در تشخیص آسیب به کمک اطلاعات محدود به چند مود اول نیز مشخص گردد. بهینه‌یاب اصلی مورد پیشنهاد این پژوهش بهینه‌یاب تعادلی است که در تمامی مثال‌ها با

نویز به شکل مودی و فرکانس و سایر داده‌های مودال اثر داده شده است. که به صورت زیر محاسبه و اعمال می‌گردد [۳۸]:

$$\omega = \omega' (1 + (2 \times (\text{random} - 0.5)) * (\text{Noise level})) \quad (12)$$

Noise level، ω و ω' به ترتیب مقدار نویز، فرکانس طبیعی قبل و بعد از اعمال نویز در مسائل تشخیص آسیب برای نزدیک‌تر کردن تحقیقات به شرایط محیطی و سازه‌های واقعی در بیشتر مواقع به داده‌ها نیز نویز اعمال می‌شود. در بررسی سازه‌ها در حالت بدون نویز هر چه تعدادهای مودهای برداشتی بیشتر باشد نتایج بهتری را نشان می‌دهد ولی در حالتی که نویز وجود دارد چون در مودهای بالاتر داده‌های بیشتری تحت اثر اغتشاش قرار می‌گیرند نتایج مودهای بالاتر، از نتایج مودهای پایین‌تر بهتر نیستند.

۴- روش بهینه‌یابی الگوریتم تعادلی

بهینه‌یابی فرآیندی است که برای مینیمم و بهتر کردن جواب مسائل استفاده می‌شود. به طور کلی، الگوریتم‌های فراکاوشی که امروزه در حل بسیاری از مسائل مهندسی از آن‌ها استفاده می‌شود، بر اساس مدلی که الگوریتم از آن الهام گرفته در چهار دسته کلی قرار می‌گیرند: الف) الگوریتم‌های تکاملی، ب) الگوریتم‌های هوش ازدحامی، ج) الگوریتم‌های مبتنی بر فیزیک، و د) الگوریتم‌های مبتنی بر روابط انسان [۳۹]. الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده در این پژوهش، بهینه‌یاب تعادلی^۵ (EO) است، که در دسته سوم، یعنی الگوریتم‌های مبتنی بر قوانین فیزیک، قرار می‌گیرد که بر مبنای معادلات تعادل جرم دینامیکی در حجم کنترل، توسط فرامرزی و همکارانش معرفی گردید [۳۹]. این معادله که معادله دیفرانسیل معمولی درجه اول است، به صورت زیر می‌باشد:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G \quad (13)$$

که در آن $V \frac{dC}{dt}$ نرخ تغییر جرم در حجم V بوده و C تمرکز داخل حجم را نشان می‌دهد. همچنین V نشانگر حجم کنترلی است و Q جریان حجمی ورودی و خروجی حجم کنترل را نشان می‌دهد. همچنین C_{eq} نشان‌دهنده تمرکز حالت تعادلی بوده و G نرخ تولید جرم در داخل حجم کنترل است. پس از حل معادله دیفرانسیل فوق، معادلات زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{G}{V}} = dt \quad (14)$$

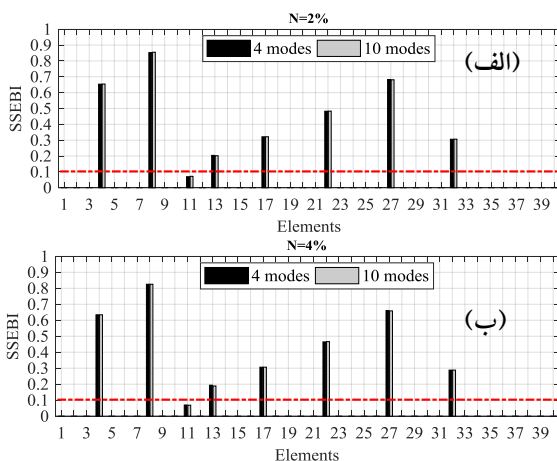
$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{\lambda C_{eq} - \lambda C + \frac{G}{V}} = \int_{t_0}^t dt \quad (15)$$

$$F = e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (16)$$

$$C = C_{eq} + (C_0 - C_{eq})F + \frac{G}{\lambda V}(1-F) \quad (17)$$

⁵ Equilibrium optimizer

حتی اگر المانی نیز به اشتباه به عنوان آسیب دیده معرفی می‌شد، پس از تعیین شدت آسیب دیدگی آن در گام دوم، شدت آسیب برای آن المان صفر بدست می‌آمد و در نتیجه آن المان سالم تلقی می‌شد. حال پس از معرفی المان‌های مذکور به مدل در گام دوم، شدت آسیب در این المان‌ها تعیین می‌گردد. این کار به کمک بهینه‌یاب تعادلی که پیش‌تر معرفی شد صورت می‌گیرد. مجدداً، نتایج در این گام نیز با استفاده از اطلاعات حاصل از چند مود اول سازه محاسبه شده‌اند تا توانایی روش پیشنهادی در حضور اطلاعات مودال ناقص نیز مشخص شود. همچنین مجدداً درصد‌های مختلف نوبز برای فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده فرض شده‌اند. نهایتاً، نتایج تشخیص آسیب برای گام دوم مربوط به سناریوی آسیب مدنظر در این مثال عددی در شکل ۳ ارائه شده‌اند. در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که روش پیشنهادی در تعیین شدت آسیب در المان‌ها نیز موفق عمل کرده و نتایج دقت بسیار بالایی دارند و حتی استفاده از اطلاعات مودال ناقص و حضور نوبز در اندازه‌گیری‌ها نیز دقت نتایج را آنچنان تحت تاثیر قرار نداده است.

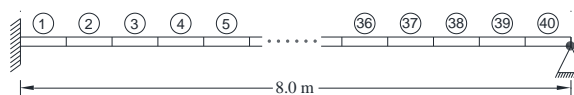


شکل ۲- نتایج تشخیص آسیب برای تیر ۴۰ المانی در گام اول (الف) مکان المان‌های آسیب‌دیده با در نظرگیری ۲٪ نوبز؛ (ب) مکان المان‌های آسیب‌دیده با در نظرگیری ۴٪ نوبز در فرکانس‌های طبیعی سازه

۱۰۰۰ تکرار و تعداد ۵۰ ذره و ضرایب $a_1 = 2$ و $a_2 = 1$ و $G_p = 0.5$ مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین پایداری الگوریتم بهینه‌یابی مذکور با ارائه نتایج بهینه‌یاب در چندین ران متوالی نشان داده شده است. مثالی مقایسه‌ای برای مقایسه بین روش پیشنهادی این تحقیق با یک پژوهش مشابه نیز انجام شده است که ارائه می‌گردد.

۵-۱- تیر ۴۰ المانی

مثال عددی اولی که در این بخش ارائه می‌گردد یک تیر ۴۰ المانی است که در شکل ۱ نشان داده شده است. طول این تیر ۸ متر بوده و سطح مقطع آن $A = 0.12 \text{ m}^2$ است. این تیر از مصالح فولادی با $E = 250 \text{ Gpa}$ و $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ ساخته شده است. برای این مثال عددی، یک سناریو آسیب فرض و بررسی شده است که مشخصات آن در جدول ۱ مشاهده می‌گردد.



شکل ۱- تیر ۴۰ المانی

جدول ۱- سناریوی آسیب تیر ۴۰ المانی

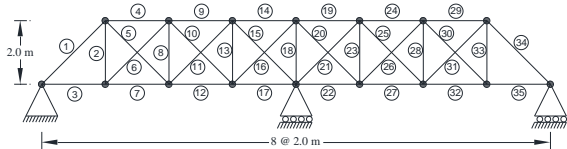
شماره المان	4	8	13	17	22	27	32
آسیب (%)	25	30	10	15	20	25	15

در جدول فوق مشاهده می‌گردد که ۷ المان آسیب دیده با شدت آسیب‌های مختلف در اینجا فرض شده‌اند. برای بررسی آسیب دیدگی در این اعضای سازه‌ای ابتدا المان‌های مشکوک به آسیب با استفاده از شاخص SSEBI که در فصل قبل تعریف و معرفی گردید شناسایی می‌شوند. نتایج حاصل در دو حالت مختلف با در نظرگیری ۲٪ و همچنین ۴٪ نوبز برای فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده‌اند. همچنین، به منظور تطابق بیشتر نتایج با واقعیت، اطلاعات مودال تنها از تعداد مودهای محدودی از سازه مورد استفاده قرار داده شده‌اند. نتایج تشخیص آسیب حاصل از گام اول، که شامل شناسایی و معرفی المان‌های مشکوک به آسیب است، در شکل ۲ ارائه شده‌اند.

از شکل فوق مشاهده می‌شود که ۷ المان مشکوک به آسیب شناسایی شده‌اند. بنابراین، فقط شدت آسیب مربوط به این ۷ المان لازم است در گام بعدی تعیین گردد. در شرایطی که فقط از روش به‌روزرسانی مدل استفاده می‌شد، باید درصد آسیب همه المان‌های سازه به عنوان مجهول به مدل معرفی می‌شد و تک تک این مجهولات باید تعیین می‌شدند، که اگر با سازه بزرگ و پرالمات مواجه بودیم، روش به‌روزرسانی دیگر به خوبی از عهده تشخیص آسیب بر نمی‌آمد. این به خوبی اهمیت استفاده از این روش دو مرحله‌ای و نقش آن را در افزایش دقت و سرعت نتایج نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات جدول ۱، همه المان‌های شناسایی شده توسط گام اول به درستی تشخیص داده شده‌اند و هیچ المانی به اشتباه معرفی نشده است و المانی نیز از قلم نیفتاده است. اما با این حال،

۵-۲- خرابای مسطح ۳۵ المانی

سازه مورد بررسی در این بخش یک خرپای دوبعدی ۳۵ المانی به صورت نشان داده شده در شکل ۵ است. این خرپا از فولاد با $E = 210 \text{ GPa}$ و $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ساخته شده است. سطح مقطع المان‌های افقی، عمودی و قطری این خرپا به ترتیب $A = 0.008 \text{ m}^2$ ، $A = 0.005 \text{ m}^2$ و $A = 0.005 \text{ m}^2$ هستند.



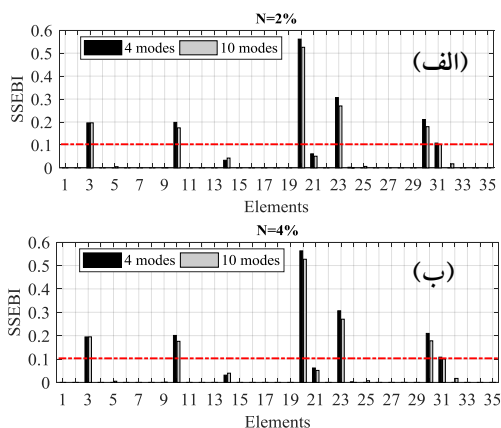
شکل ۵- خرپای مسطح ۳۵ المانی

برای این سازه سناریوی آسیبی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. طبق جدول، ۵ المان آسیب دیده در این خرپا در نظر گرفته شده‌اند. بررسی کارایی و دقت روش در تشخیص آسیب المان‌های نزدیک به تکیه‌گاه، المان ۳ که متصل به تکیه‌گاه ساده سمت چپ خرپا است، آسیب‌دیده در نظر گرفته شده است.

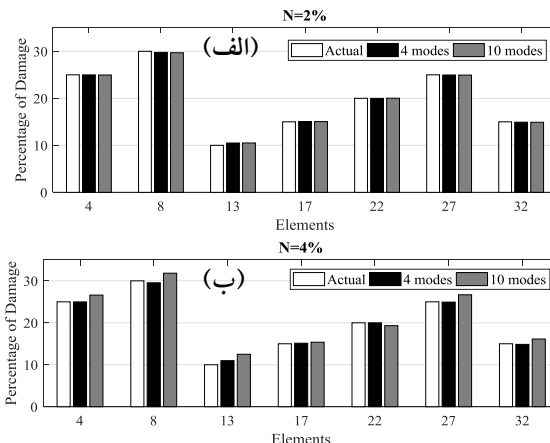
جدول ۲- سناریوی آسیب خرپای مسطح ۳۵ المانی

شماره المان	3	10	20	23	30
آسیب (%)	10	15	30	5	10

مجدداً، المان‌های آسیب دیده ابتدا توسط SSEBI در گام اول شناسایی و معرفی می‌گردند. این کار با در نظرگیری دو سطح نویز مختلف، ۲٪ و ۴٪، در فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده انجام می‌شود تا اثرات این عامل بر نتایج نیز در نظر گرفته شوند. نتایج مربوط به این دو حالت در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. همه نتایج در اینجا با در نظرگیری اطلاعات حاصل از ۴ و ۱۰ مود اول خرپا به دست آمده‌اند.

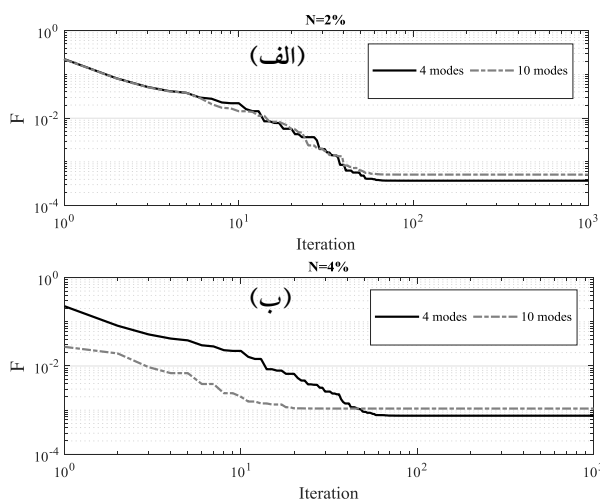


شکل ۶- نتایج تشخیص آسیب برای خرپای ۳۵ المانی در گام اول (الف) مکان المان‌های آسیب دیده با در نظرگیری ۲٪ نویز؛ (ب) مکان المان‌های آسیب دیده با در نظرگیری ۴٪ نویز در فرکانس‌های طبیعی سازه



شکل ۳- نتایج تعیین شدت آسیب المان‌های آسیب دیده در گام دوم تیر ۴۰ المانی به کمک الگوریتم تعادلی؛ (الف) تحت ۲٪ نویز، (ب) تحت ۴٪ نویز در فرکانس‌های طبیعی

در شکل ۴ نمودار همگرایی مربوط به بهینه‌یاب در گام دوم برای فریند تشخیص آسیب فوق نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج نهایی تابع هدف در حالتی که ۲٪ نویز وجود داشته بهتر از حالتی است که ۴٪ نویز اعمال شده است. این نشان می‌دهد که اغتشاشات این چینی چگونه بر نتایج اثر می‌گذارند. علاوه بر این، شکل ۴ (ب) نشان می‌دهد نرخ همگرایی زمانی که اطلاعات ۱۰ مود اول استفاده شده‌اند کمی بهتر از حالتی است که اطلاعات ۴ مود وجود دارند، اما در انتهای فرآیند بهینه‌یابی این روند عوض شده و نتایج حاصل از حالت ۴ مود بهتر شده‌اند. دلیل این امر آن است که افزایش میزان نویز اندازه‌گیری اثر بیشتری بر مودهای بالاتر سازه دارد و بنابراین دقت نتایج این روش در حضور چند مود اول محدود سازه نیز دقت کافی را دارند.



شکل ۴- نمودارهای همگرایی الگوریتم تعادلی برای تیر ۴۰ المانی؛ (الف) تحت ۲٪ نویز، (ب) تحت ۴٪ نویز در فرکانس‌های طبیعی

جدول ۴- نتایج تعیین شدت آسیب‌های المان‌های آسیب دیده در گام دوم خرابی مسطح ۳۵ المانی به کمک الگوریتم تعادلی تحت ۴٪ نوبه در فرکانس‌های طبیعی

المان‌های مشکوک	تعداد مودها	درصد آسیب				خطای درصد خطا در کل ران‌ها
		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	
3	4	9.936 8	9.936 8	9.936 8	9.936 8	0.63
	10	9.928 6	9.928 6	9.928 6	9.928 6	0.71
10	4	14.80 59	14.80 58	14.80 59	14.80 59	1.29
	10	15.28 15	15.28 15	15.28 15	15.28 15	1.87
20	4	30.31 32	30.31 32	30.31 32	30.31 32	1.04
	10	30.37 73	30.37 73	30.37 73	30.37 73	1.25
23	4	4.737 7	4.737 7	4.737 7	4.737 7	5.24
	10	4.794 9	4.794 9	4.794 9	4.794 9	4.1
30	4	9.055 4	9.055 4	9.055 4	9.055 4	9.44
	10	6.542 7	6.542 8	6.542 7	6.542 7	34.57
31	4	0	0	0	1.02e-13	0
	10	0	5.40e-14	0	0	0

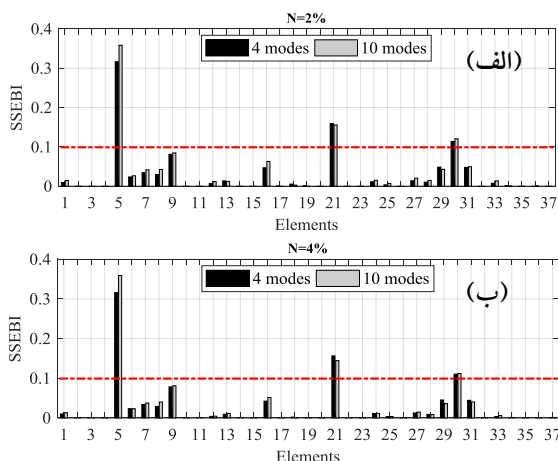
اولین نکته قابل توجه در نتایج فوق این است که شدت آسیب برای المان ۳۱ که در گام اول به اشتباه به عنوان آسیب دیده معرفی شده بود، صفر بدست آمده است که نشان می‌دهد گام دوم به خوبی می‌تواند خطاهای گام اول را جبران کند. همچنین به وضوح مشاهده می‌شود که نتایج ۴ ران متوالی ارائه شده در جداول بسیار مشابه هم هستند و تنها اختلاف

شکل ۶ به خوبی نشان می‌دهد که همه المان‌های آسیب دیده به درستی شناسایی شده‌اند، اما در این بخش المان ۳۱ به اشتباه مشکوک به آسیب معرفی شده است. پس از اتمام گام اول، نوبت به تعیین شدت آسیب المان‌ها توسط گام دوم است. مشابه مثال قبلی، مسئله در این بخش به کمک الگوریتم بهینه‌یاب تعادلی با ۱۰۰۰ تکرار حل شده است. در این مثال، نتایج گام دوم در ۴ ران متوالی تکرار شده‌اند تا پایداری نتایج بهینه‌یاب به وضوح نشان داده شود. بنابراین، نتایج تشخیص آسیب در این بخش حاصل از ۴ ران متوالی برای دو سطح نویز مختلف ۲٪ و ۴٪ در جداول ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. همچنین بیشترین درصد خطا در نتایج در بین همه ران‌ها برای هر حالت، در جداول ارائه شده است تا دقت نتایج ارزیابی شود.

جدول ۳- نتایج تعیین شدت آسیب‌های المان‌های آسیب دیده در گام دوم خرابی مسطح ۳۵ المانی به کمک الگوریتم تعادلی تحت ۲٪ نوبه در فرکانس‌های طبیعی

المان‌های مشکوک	تعداد مودها	درصد آسیب				خطای درصد خطا در کل ران‌ها
		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	
3	4	9.9684	9.9684	9.9684	9.9684	0.31
	10	9.9643	9.9643	9.9643	9.9643	0.35
10	4	14.902 9	14.902 9	14.902 9	14.902 9	0.64
	10	15.141 9	15.141 9	15.141 9	15.141 9	0.95
20	4	30.156 9	30.156 9	30.156 9	30.156 9	0.52
	10	30.188 5	30.188 5	30.188 5	30.188 5	0.63
23	4	4.8691	4.8691	4.8691	4.8691	2.62
	10	4.8978	4.8978	4.8978	4.8978	2.04
30	4	9.5296	9.5296	9.5295	9.5296	4.7
	10	8.2849	8.2849	8.2849	8.2850	17.15
31	4	0	0	1.40e-12	0	0
	10	0	7.69e-15	0	5.49e-12	0

ابتدا المان‌های مشکوک به آسیب در گام اول به کمک شاخص SSEBI تشخیص داده می‌شوند. مشابه مثال قبلی، این گام مجدداً با در نظرگیری ۲٪ و ۴٪ نویز در فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده انجام می‌شود. نتایج حاصل برای این بخش در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. همه نتایج در اینجا با در نظرگیری اطلاعات حاصل از ۴ و ۱۰ مود اول قاب به دست آمده‌اند.



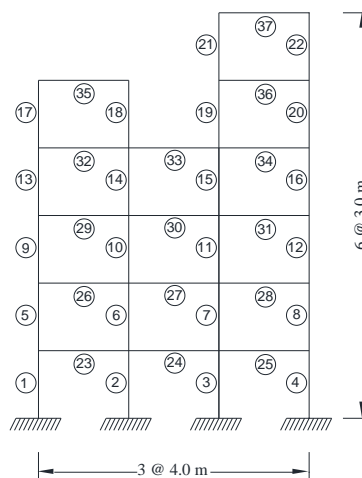
شکل ۸- نتایج تشخیص آسیب برای قاب در گام اول الف) مکان المان‌های آسیب دیده با در نظرگیری ۲٪ نویز؛ ب) مکان المان‌های آسیب دیده با در نظرگیری ۴٪ نویز در فرکانس‌های طبیعی سازه

مشاهده می‌گردد که همه المان‌ها به درستی شناسایی شده‌اند و هیچ المانی به اشتباه معرفی نشده و المانی از قلم نیفتاده است. پس از این مرحله، شدت آسیب در این المان‌ها باید تعیین شود. این کار مطابق قبل با استفاده از روش به‌روزرسانی مدل در گام دوم صورت می‌گیرد و برای حصول نتایج از بهینه‌یاب تعادلی استفاده می‌شود. مشابه مثال قبلی، این گام برای این مثال هم در ۴ ران متوالی ثبت شده و نتایج آن‌ها در اینجا ارائه می‌گردد تا پایداری نتایج و جواب‌ها مشخص گردد. اما، در این قسمت به جای ارائه خود نتایج ۴ ران، میانگین آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده و انحراف استاندارد این نتایج محاسبه شده و ارائه گردیده است. این کار به منظور اثبات پایداری نتایج به روشی متفاوت با مثال قبل انجام شده است.

جزیی در آن‌ها مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که روش پیشنهادی تا چه حد برای تشخیص آسیب قابل اطمینان است. علاوه بر این موارد، هرچند بهینه‌یاب فراکوشی مورد استفاده طبیعتی کاملاً تصادفی برای تعیین نتایج دارد، اعداد نهایی بدست آمده برای همه ران‌ها بسیار نزدیک به هم هستند که نشان دهنده پایداری روش و تابع هدف است. ملاحظه می‌گردد که در حالت ۲٪ نویز، حداکثر ۱۷،۱۵ درصد خطا در نتایج دیده می‌شود که مربوط به المان ۳۰ در حالت ۱۰ مود بوده است. در حالت ۴٪ نویز، میزان خطای حداکثر که مجدداً مربوط به همین المان در حالت ۱۰ مود است، به ۳۴،۵۷ درصد نیز رسیده است که نشان دهنده تاثیر افزایش درصد نویز بر روی نتایج، به ویژه در مودهای بالاتر است.

۵-۳- قاب

در این بخش یک قاب که در شکل ۷ نشان داده شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. تیرهای این قاب همگی دارای سطح مقطع $A = 85.5 \times 10^{-4} m^2$ و برای آن‌ها $I = 10322.2 \times 10^{-8} m^4$ است. همچنین همه ستون‌ها دارای سطح مقطع $A = 90 \times 10^{-4} m^2$ و $I = 11436.9 \times 10^{-8} m^4$ هستند. قاب از مصالح فولادی با $\rho = 7850 kg/m^3$ و $E = 210 Gpa$ ساخته شده است.



شکل ۷- قاب

برای این قاب، سناریوی آسیبی به صورت نشان داده شده در جدول ۵ تعریف شده است. دو ستون آسیب دیده و یک تیر آسیب دیده در این سناریو در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۵- سناریوی آسیب قاب

شماره المان	5	21	30
آسیب (%)	20	10	15

۵-۴- مثال مقایسه‌ای - تیر طره ۱۵ المانی

در این بخش، روش پیشنهادی پژوهش حاضر با نتایج دو پژوهش دیگر که قبلاً چاپ شده‌اند مقایسه می‌گردد. اولین پژوهش انتخابی این بخش برای مقایسه، از روشی مشابه با تحقیق حاضر برای تشخیص آسیب استفاده کرده است که برای مشاهده جزئیات بیشتر درباره آن می‌توان به رفرنس شماره [۴۰] مراجعه کرد. در واقع مقاله مذکور از روشی دومرحله‌ای برای تشخیص آسیب استفاده می‌کند که در گام اول ابتدا مکان المان‌های آسیب دیده مشخص شده و سپس شدت آسیب در گام دوم تعیین می‌شود، که از این لحاظ بسیار شبیه پژوهش حاضر است. شاخص آسیبی که پژوهش مذکور برای گام اول خود معرفی کرده MSEBI نام دارد و مبتنی بر انرژی کرنشی مودال سازه است. همچنین رفرنس مذکور از به‌روزرسانی مدل در گام دوم بهره گرفته و از بهینه‌یاب ازدحام گروه ذرات، PSO برای محاسبه نتایج کمک گرفته است. سازه مورد استفاده برای مقایسه نتایج در این بخش یک تیر طره ۱۵ المانی به صورت نشان داده شده در شکل ۴ است و دو المان آسیب دیده دارد که این‌ها نیز در شکل مشخص شده‌اند.

جزئیات سناریوی آسیب مذکور برای این تیر همچنین در جدول ۷ نیز مشاهده می‌شود. طبق رفرنس اصلی، طول، ضخامت، و عرض این تیر به ترتیب $2.74m$ ، $0.006m$ و $0.0760m$ هستند. چگالی جرمی تیر $7860 kg / m^2$ بوده و مدول الاستیسیته آن $210 GPa$ می‌باشد. ابتدا مکان المان‌های آسیب دیده هم توسط شاخص MSEBI رفرنس اصلی و هم شاخص SSEBI پژوهش کنونی شناسایی شده‌اند تا عملکرد آن‌ها مقایسه شود. در اینجا تشخیص آسیب با استفاده از اطلاعات حاصل از یک مود اول و پنج مود اول سازه انجام شده است.



شکل ۹- تیر طره ۱۵ المانی

جدول ۷- سناریوی آسیب تیر طره ۱۵ المانی

شماره المان	4	12
آسیب (%)	30	30

لازم به ذکر است این مثال بدون در نظرگیری اثر نوپز بررسی شده است تا کارایی دو پژوهش به وضوح بیشتری در شرایط ایده‌آل بدون نوپز دیده شود. نتایج تشخیص آسیب با استفاده از یک و پنج مود اول سازه توسط هر دو روش در گام اول در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند.

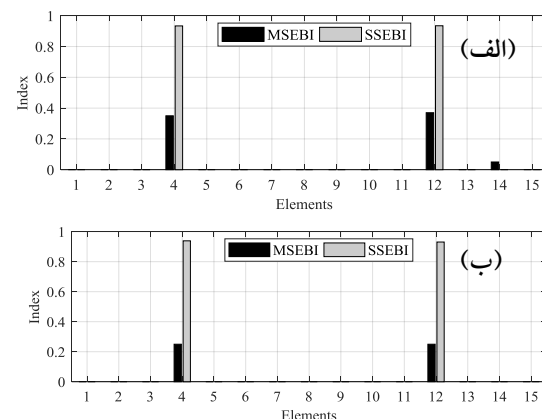
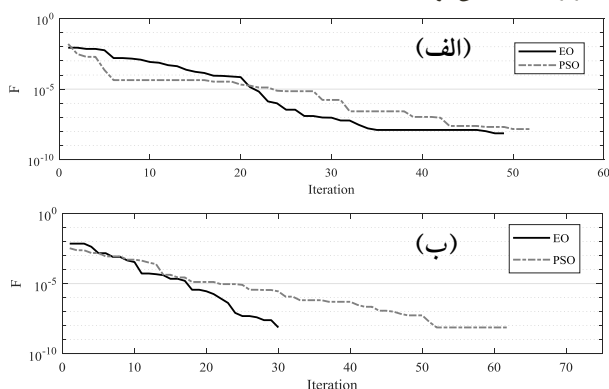
در شکل ۱۰، MSEBI که با رنگ سیاه نشان داده شده به نتایج حاصل از تشخیص آسیب گام اول توسط شاخص پیشنهادی رفرنس انتخابی اشاره می‌کند و SSEBI که با رنگ طوسی نشان داده شده نتایج حاصل از شاخص پیشنهادی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در حالی که هر دو روش قادر به تشخیص درست المان‌های آسیب دیده بوده‌اند، MSEBI المان ۱۴ را به اشتباه در حالی که از اطلاعات مود اول استفاده شده، آسیب دیده نشان داده است.

جدول ۶- نتایج تعیین شدت آسیب المان‌های آسیب دیده در گام دوم قاب به کمک الگوریتم تعادلی تحت ۲٪ و ۴٪ نوپز در فرکانس‌های طبیعی

تعداد مودها	المان‌های مشکوک	نوفه ۲%			نوفه ۴%		
		درصد آسیب	انحراف استاندارد	درصد خطای نتایج	درصد آسیب	انحراف استاندارد	درصد خطای نتایج
4	5	19.9897	3.40e-4	0.05	19.9792	4.43e-4	0.1
	21	9.2526		7.4	8.4788		15.21
	30	14.5990		2.67	14.1925		5.38
10	5	19.9248	4.61e-4	0.37	20.1240	6.58e-3	0.62
	21	8.8171		11.82	8.2045		17.95
	30	14.6466		2.35	14.0868		6.08

ملاحظه می‌شود که نتایج بسیار به مقادیر آسیب واقعی نزدیک هستند و همچنین مقدار انحراف استاندارد نتایج در ۴ ران متوالی بسیار ناچیز است که حاکی از پایداری مناسب نتایج است. در واقع، صرف نظر از تعداد مودهای مورد استفاده و یا حتی حضور نوپزهای اندازه‌گیری، روش پیشنهادی همواره نتایج پایداری ارائه نموده است که اعتبار روش را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین طبق جدول، حداکثر خطای نتایج در حالت ۲٪ نوپه ۱۱.۸۲ درصد بوده که در مورد المان ۲۱ در شرایط ۱۰ مود اتفاق افتاده است. در شرایط ۴٪ نوپه، بیشترین خطا مربوط به المان ۲۱ در حالت ۱۰ مود بوده که نتیجه ارائه شده ۱۷.۹۵ درصد خطا داشته است، اما در این شرایط درصد خطای مربوط به المان ۲۱ در حالت ۴ مود نیز ۱۵.۲۱ است که تقریباً قابل قبول بوده است.

استفاده از اطلاعات مود اول شناسایی کند، در حالی که برای تعیین شدت آسیب حداقل به ۵ مود نیاز دارد. این در حالی است که همانطور که از نتایج این مثال مقایسه‌ای مشاهده شد، روش پیشنهادی پژوهش حاضر می‌تواند هم محل و هم شدت آسیب را تنها با استفاده از اطلاعات ۱ مود نیز به درستی تعیین نماید که این مزیت بسیار بزرگی است. در واقع این امر نشان دهنده نوآوری و کارایی مناسب شاخص آسیب و همچنین تابع هدف پیشنهادی در این پژوهش است. در نتیجه این مثال مقایسه‌ای همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تابع هدف پیشنهادی این پژوهش سازگاری خوبی با سایر بهینه‌یاب‌ها دارد چرا که نتایج الگوریتم PSO نیز بسیار رضایت بخش بوده اند.



شکل ۱۰- نتایج تشخیص آسیب برای تیر طره ۱۵ المانی در گام اول با استفاده از MSEBI و SSEBI (الف) مکان المان‌های آسیب دیده با در نظرگیری اطلاعات مود اول؛ (ب) مکان المان‌های آسیب دیده با در نظرگیری اطلاعات ۵ مود اول

حال به منظور تعیین شدت آسیب در این المان‌ها، لازم است گام دوم اجرا شود. در این گام، روند به‌روزرسانی مدل با استفاده از تابع هدف پیشنهادی فقط پژوهش حاضر، یعنی تابع معرفی شده توسط فرمول ۷ که در فصل سوم ارائه شد، برای تعیین شدت آسیب استفاده می‌شود. نتایج به کمک دو بهینه‌یاب تعادلی (EO) و همچنین بهینه‌یاب PSO در این بخش ارائه می‌گردند. هدف از استفاده از این دو بهینه‌یاب این است که عملکرد آنها در اینجا مقایسه شود. نتایج تشخیص آسیب مربوط به این بخش در جدول ۸ ارائه شده‌اند.

جدول ۸- نتایج تعیین شدت آسیب المان‌های آسیب دیده در گام دوم تیر طره ۱۵ المانی با EO و PSO

المان مشک وک	آسیب واقعی (%)	1 mode		5 modes	
		EO	PSO	EO	PSO
4	30	30	30	30	29.9
12	30	29.9	30	29.9	30.3

مشاهده می‌شود که هر دو الگوریتم تقریباً به درستی همه شدت آسیب‌های مفروض را تشخیص داده‌اند.

به منظور مقایسه، نمودارهای همگرایی مربوط به این دو بهینه‌یاب برای هر دو حالت نتایج با استفاده از ۱ و ۵ مود اول در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. هر دو الگوریتم مطابق این شکل در هر دو حالت تقریباً قبل از ۶۰ تکرار همگرا شده‌اند اما الگوریتم EO با سرعت بیشتری به نتایج نهایی تابع هدف رسیده است. مطابق آنچه نویسنده رفرنس مقایسه‌ای مذکور، در مقاله خود گفته، روش او می‌تواند محل المان‌های آسیب دیده را با

شکل ۱۱- نمودارهای همگرایی الگوریتم‌های EO و PSO برای تیر طره ۱۵ المانی؛ (الف) با استفاده از اطلاعات مود اول، (ب) با استفاده از اطلاعات ۵ مود اول

پژوهش دومی که برای مقایسه در این بخش انتخاب شده و پیش‌تر در ابتدای توضیحات این بخش به آن اشاره شد، یک مقاله تشخیص آسیب است که با استفاده از تابع هدف‌های تضمین مدی چندآسیبی (MDLAC) و همچنین تابع هدف خطای فرکانسی و به کمک بهینه‌یاب الگوریتم ژنتیک در یک چارچوب به‌روزرسانی مدل به تشخیص خرابی در سازه‌ها می‌پردازد. جزئیات بیشتر درباره تابع هدف‌ها و سایر موارد مربوط به مقاله مذکور را می‌توان در مرجع شماره [۴۱] پیدا کرد. در مقاله مذکور به منظور اعتبارسنجی، روش پیشنهادی بر روی تیر طره ای که شرایطی دقیقاً مشابه تیر مورد بررسی در این بخش را دارد تست شده است و بنابراین با مقایسه نتایج آن با نتایج مقاله حاضر نتایج بسیار مفیدی در زمینه کارایی روش پیشنهادی حاضر ارائه می‌گردند. در شکل ۱۲ نتایج تشخیص آسیب بدست آمده در مقاله مورد مقایسه توسط هر دو تابع هدفی که در فوق به آن اشاره گردید، ارائه شده است. لازم به ذکر است که نتایج این قسمت برای سناریوی آسیبی دقیقاً مطابق جدول ۷ محاسبه شده‌اند و مربوط به حالت بدون در نظرگیری نویز اندازه‌گیری هستند. نتایج مقاله حاضر در چنین شرایطی در شکل ۱۰ مکان المان‌های آسیب‌دیده و جدول ۸ برای شدت آسیب‌ها پیش‌تر ارائه شدند.

گزارش می‌گردید. همچنین دقت نتایج روش مقاله حاضر برای المان‌های آسیب دیده بسیار بالا بوده به طوری که نتایج ارائه شده اختلاف بسیار جزئی با شدت آسیب واقعی المان‌ها دارند.

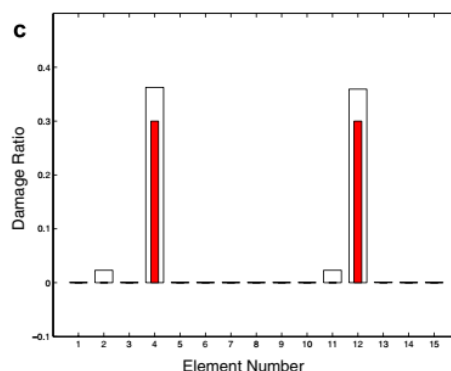
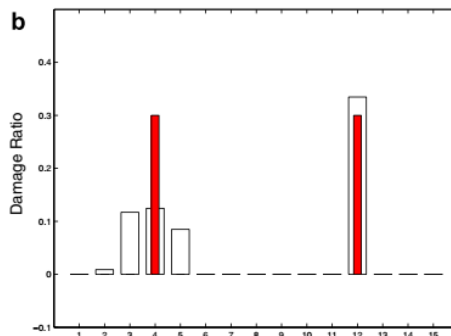
۶- مطالعه اعتبارسنجی آزمایشگاهی

در این قسمت روش پیشنهادی این پژوهش بر روی یک نمونه آزمایشگاهی تست شده تا موفقیت روش در شرایط عملی و واقعی نیز محک زده شود. سازه آزمایشگاهی انتخابی برای این بخش برگرفته از تیر تست شده توسط مرادی پور در رفرنس [۴۲] است، که یک تیر دوسر ساده ۸ المانی فولادی به صورت نشان داده شده در شکل ۱۳ است. مشخصات تیر در جدول ۹ با جزئیات بیشتری ارائه شده‌اند. این تیر در لابراتوار بانیوپایلویت در دانشگاه کوینزلند تست گردیده است.

جدول ۹- مشخصات فیزیکی و مصالح تیر دوسر ساده آزمایشگاهی

پارامتر	مقدار
طول تیر (L)	3.30 m
مدول الاستیسیته (E)	$206 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
سطح مقطع (A)	$3.1064 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
ممان اینرسی دوم (I)	$3.18853 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
چگالی جرمی (ρ)	7865 kg/m^3

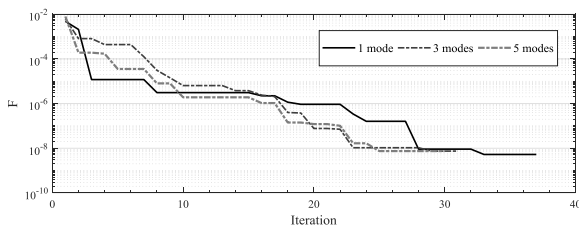
در این مطالعه آزمایشگاهی، به میزان ۲۵٪ در المان ۷ آسیب ایجاد شده است. در اینجا سعی بر این است که این المان آسیب دیده به کمک روش دوم مرحله‌ای پیشنهادی این پژوهش به کمک بهینه‌یاب تعادلی تعیین آسیب شود. نتایج تشخیص آسیب حاصل از گام اول برای این تیر در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است در این نمونه نتایج این گام با استفاده از اطلاعات ۱، ۳ و ۵ مود اول بدست آمده‌اند تا نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار گیرد.



شکل ۱۲- نتایج پژوهش مرجع [۴۱] برای تشخیص آسیب المان‌های آسیب دیده در تیر طره ۱۵ المانی، میله قرمز نشان دهنده مقدار واقعی آسیب بوده و میله توخالی نتایج حاصل از تابع هدف‌ها (الف) با استفاده از تابع خطای فرکانسی (ب) با استفاده از تابع هدف MDLAC

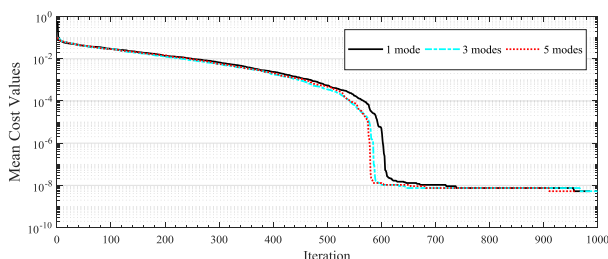
مطابق شکل ۱۲-الف مشخص است که تابع هدف خطای فرکانسی مکان و شدت آسیب المان ۱۲ را تا حدود زیادی درست تشخیص داده است هرچند اختلافی در تخمین شدت آسیب مشاهده می‌شود. در همین شکل، برای تخمین شدت آسیب المان ۴ تخمین شدت آسیب دارای خطای قابل توجهی بوده و علاوه بر آن، آسیب‌های اشتباهی در المان‌های سالم شماره ۲، ۳، و ۵ نیز گزارش شده‌اند که در مورد المان‌های شماره ۳ و ۵ که دقیقاً مجاور المان آسیب دیده شماره ۴ هستند، شدت آسیب تخمین زده شده به اشتباه، عدد نسبتاً بزرگی نیز بوده است. نتایج شکل ۱۲-ب حاکی از آن هستند که تابع هدف MDLAC دقت بهتری در ارائه نتایج داشته است، اما همچنان خطایی در تخمین شدت آسیب المان‌ها بوده است به طوری که برای هر دو المان ۴ و ۱۲، به جای ۳۰ درصد، آسیب در حدود ۳۵ درصد گزارش شده است. همچنین درصد آسیب کمی به اشتباه برای المان‌های ۲ و ۱۱ که در مجاورت المان‌های آسیب‌دیده هستند گزارش شده‌اند. این موارد در حالی است که روش پیشنهادی مقاله حاضر، اولاً هیچ المان سالمی را به اشتباه معرفی ننموده و حتی اگر المانی به اشتباه مشکوک به آسیب معرفی می‌شد، در گام دوم شدت آن صفر

خوب عمل می‌کند، که قابلیت عملی و کاربردی این روش تشخیص آسیب را نشان می‌دهد. نمودار همگرایی بهینه‌یاب تعادلی برای این مثال در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد که بهینه‌یاب تعادلی با تعداد تکرار بسیار کمی به صفر همگرا شده است.

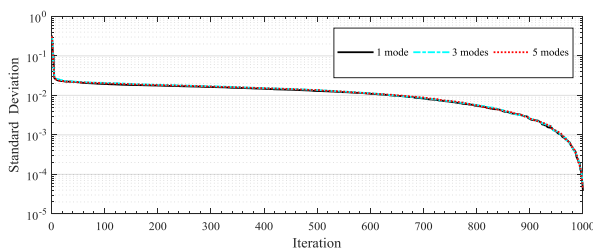


شکل ۱۶- نمودارهای همگرایی الگوریتم EO برای تیر دوسر سازه ۸ المانی به کمک الگوریتم تعادلی با در نظرگیری اطلاعات مود اول، ۳ مود اول، و ۵ مود اول

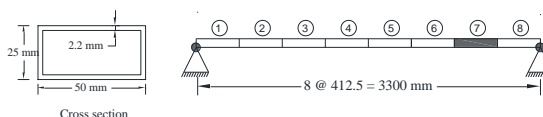
همچنین به منظور مشاهده بیشتر جزئیات عملکرد الگوریتم بهینه‌یابی EO، در این بخش دو نمودار میانگین و انحراف معیار نتایج تابع هدف در هر تکرار بهینه‌یاب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ارائه می‌گردند. در نمودار شکل ۱۷ میانگین مقادیر تابع هدف به ازای ۱۰۰ ذره در هر تکرار در الگوریتم بهینه‌یاب EO رسم شده است.



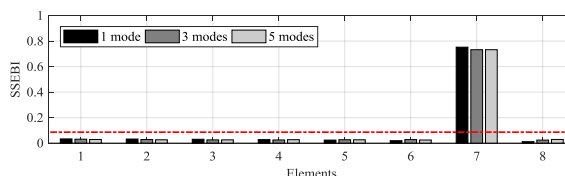
شکل ۱۷- نمودار میانگین مقادیر تابع هدف در هر تکرار الگوریتم EO برای تیر دو سر ساده ۸ المانی آزمایشگاهی در نمودار فوق مشاهده می‌شود که پس از هر تکرار مقادیر کمینه‌تری برای تابع هدف به طور میانگین توسط بهینه‌یاب بدست آمده است، ولی روند این کاهش مقدار از تکرار ۵۰۰ تا ۶۰۰ با شیب بسیار زیادی کاهش یافته است و پس از آن نمودار روند نسبتاً ثابتی داشته و در حدود تکرار ۱۰۰۰ مقدار تابع هدف به کمترین مقدار خود رسیده است.



شکل ۱۸- نمودار انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف در هر تکرار الگوریتم EO برای تیر دو سر ساده ۸ المانی آزمایشگاهی

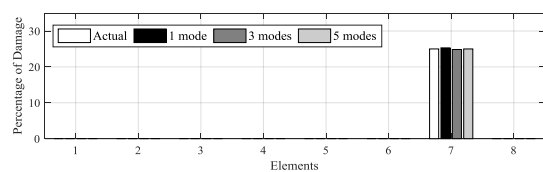


شکل ۱۳- تیر دوسر سازه ۸ المانی تست شده توسط [۴۲]



شکل ۱۴- نتایج تشخیص آسیب برای تیر دو سر سازه ۸ المانی در گام اول با در نظرگیری اطلاعات ۱ مود اول، ۳ مود اول، و ۵ مود اول

مطابق این شکل، المان ۷ به درستی به عنوان مشکوک به آسیب معرفی شده است و در گام بعدی برای تعیین شدت آسیب به مدل معرفی می‌شود. هیچ المان سالمی به اشتباه در این گام مشکوک به آسیب معرفی نشده است. نتایج گام دوم به کمک به‌روزرسانی مدل و بهینه‌یاب تعادلی در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۵- نتایج تعیین شدت آسیب المان‌های آسیب دیده در گام دوم تیر دوسر سازه ۸ المانی به کمک الگوریتم تعادلی با در نظرگیری اطلاعات مود اول، ۳ مود اول، و ۵ مود اول

از شکل فوق مشاهده می‌گردد که روش پیشنهادی به خوبی قادر به تعیین شدت آسیب در المان مفروض بوده است. در واقع، درصد آسیب واقعی المان هفتم ۲۵٪ بوده است، که در حالت استفاده از اطلاعات ۱ مده، شدت آسیب این المان ۲۵٫۷۳٪ بدست آمده است. در حالت استفاده از اطلاعات ۳ مده، ۲۴٫۸۱٪ و در حالت ۵ مده، ۲۴٫۹۸٪ برای شدت آسیب این المان تخمین زده شده است. با وجود این که در همه این حالت‌ها مقدار شدت آسیب با دقت بسیار خوبی گزارش شده، مشاهده می‌گردد که با افزایش تعداد مدها تخمین دقیق‌تری از شدت آسیب ارائه گردیده است. نتایج بیانگر این است که روش پیشنهادی در شرایط واقعی نیز بسیار

در شکل فوق واضح است که انحراف استاندارد نتایج ذرات با بیشتر شدن تعداد تکرارها، کاهش یافته است تا جایی که در تکرارهای آخر به صفر رسیده است.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش روشی دومرحله‌ای برای تشخیص آسیب در سازه‌ها معرفی شده است. روش به‌روزرسانی مدل، که روشی بسیار محبوب و متداول در تشخیص آسیب سازه است، در مواجهه با سازه‌های پرالمان دچار ضعف است و نمی‌تواند به درستی و با سرعت لازم به نتایج قابل قبول برسد. علت اصلی این موضوع این است که مدل به‌روزشونده باید درصد آسیب همه المان‌های سازه را مجهول در نظر بگیرد و سعی کند مقدار این مجهولات را تخمین بزند. در این راستا اگر مقدار آسیب برای المانی صفر به دست آید به این معنی است که المان سالم بوده و اگر عددی غیر از این برای المانی نتیجه شود، المان آسیب دیده است. چنین فرآیندی در شرایطی که تعداد المان‌ها زیاد است، که در همه سازه‌های دنیای واقعی این اتفاق می‌افتد، تعداد این مجهولات بسیار زیاد بوده و حتی با کمک بهینه‌یاب عملاً مدل قادر به حل مسئله نیست. بنابراین این پژوهش روشی را ارائه نموده که طی گام اول، المان‌های آسیب دیده سازه را به کمک شاخص تشخیص آسیبی شناسایی نموده و به مدل معرفی نماید. شاخص مذکور، که مفصلاً در فصول پیش به آن اشاره شد، بر مبنای انرژی کرنش استاتیکی سازه تعریف شده (در این پژوهش SSEBI نامیده شده است) و می‌تواند محل المان‌های آسیب دیده را تشخیص دهد. این شاخص به تنهایی نمی‌تواند شدت آسیب دیدگی در این المان‌ها را تعیین نماید، و فقط این المان‌ها را به مدل به‌روزشونده‌ی گام بعد معرفی می‌کند. این ترکیب بسیار کارآمد، ضمن حل کردن مشکل شاخص گام اول که نمی‌تواند شدت آسیب را تعیین کند، ایراد مربوط به به‌روزرسانی مدل را، که ضعف در برابر مسائل با تعداد المان زیاد است، به خوبی حل می‌کند چرا که تنها چند المان آسیب دیده به مدل معرفی می‌شوند تا شدت آسیب را در آن‌ها تعیین کند و بنابراین لازم نیست شدت آسیب تمامی المان‌ها را مجهول در نظر بگیرد. برای مرحله دوم حل مسئله، که همان به‌روزرسانی مدل اجزا محدودی است، یک تابع هدف بر مبنای پارامتر انرژی کرنش استاتیکی تعریف شده است که حساسیت خوبی به آسیب سازه دارد و در عین حال نسبت به نویزهای اندازه‌گیری چندان حساس و آسیب‌پذیر نیست. این تابع هدف وظیفه سنجش میزان انطباق بین داده‌های عددی پیش‌بینی شده مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی را دارد. مسئله تشخیص آسیب در این گام به کمک یک بهینه‌یاب فراکوشی به نام بهینه‌یاب تعادلی حل می‌شود تا حل مسئله به طرز چشمگیری سریع‌تر شود.

روش پیشنهادی به منظور اعتبارسنجی بر روی چندین نمونه عددی و آزمایشگاهی تست گردیده تا کارایی آن بهتر مشخص شود. ابتدا یک تیر یک دهانه ۴۰ المانی با هفت المان آسیب دیده بررسی شد که در گام اول همه این المان‌ها به درستی توسط شاخص SSEBI شناسایی شدند، و این

مسئله با در نظرگیری ۲٪ و ۴٪ نویز اندازه‌گیری در فرکانس‌های طبیعی به کمک اطلاعات ۴ مود و ۱۰ مود اول بررسی گردید، و سپس در گام دوم شدت آسیب در کلیه این حالت‌ها به درستی تخمین زده شدند. مثال عددی دوم یک خرپای مسطح ۳۵ المانی با پنج المان آسیب‌دیده بود، که در گام اول علاوه بر این پنج المان، المان سالم شماره ۳۱ نیز به اشتباه مشکوک به آسیب معرفی شد. اما در گام دوم، شدت آسیب این المان سالم صفر بدست آمده و شدت آسیب در سایر المان‌های آسیب دیده به درستی، و با حداکثر درصد خطای ۳۴٫۵۷٪، مربوط به المان شماره ۳۰ در حالت ۴٪ نویز با استفاده از اطلاعات ۱۰ مود اول، تخمین زده شدند. مثال عددی سوم مورد بررسی، یک قاب سه دهانه نامتقارن ۷ طبقه است که سه المان آسیب‌دیده دارد. شاخص SSEBI در این مورد، هر سه المان آسیب دیده را به درستی معرفی نموده و هیچ المان سالمی را به اشتباه گزارش نکرد. در گام دوم، شدت آسیب المان‌ها با دقت خوب و با حداکثر درصد خطای ۱۷٫۹۵٪، مربوط به المان ۲۱ در حالت ۴٪ نویز با اطلاعات ۱۰ مود، تخمین زده شدند. یک مطالعه مقایسه‌ای نیز انجام شد تا کارایی روش پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با دو پژوهش پیشین بررسی شود. همچنین سعی گردید نتایج گام دوم به کمک یک بهینه‌یاب دیگر نیز محاسبه شوند تا هم سازگاری روش پیشنهادی با انواع بهینه‌یاب فراکوشی مشخص شده و هم برتری بهینه‌یاب انتخابی این تحقیق در سازگاری با این روش مشخص گردد. در نهایت، یک سازه آزمایشگاهی که در یک پژوهش پیشین تست و بررسی شده بود، انتخاب شده و روش پیشنهادی این پژوهش بر روی آن تست گردید تا عملکرد این روش در شرایط عملی و واقعی سنجیده شود. همچنین پس از بررسی این مثال آزمایشگاهی، نمودار میانگین و همچنین انحراف معیار نتایج تابع هدف به ازای صد ذره در هر تکرار الگوریتم بهینه‌یاب تعادلی ارائه شدند تا دقت نتایج و کارایی الگوریتم بهینه‌یابی EO به وضوح بیشتری مشاهده گردد. همه نتایج حاصل از نمونه‌های عددی، مقایسه‌ای و آزمایشگاهی در این پژوهش موفقیت آمیز بوده و نشان‌دهنده سازگاری، پایداری زیاد نتایج، و دقت و سرعت بسیار خوب روش پیشنهادی در شرایط مختلف بودند. در پژوهش‌های آتی در این زمینه، می‌توان موارد مختلفی را بررسی نمود. از جمله می‌توان عمر باقیمانده سازه‌ها پس از تعیین و تشخیص آسیب را تخمین زد.

منابع

- [1] Yao JT. Safety and reliability of existing structures. Boston: Pitman. 1985.
- [2] Frangopol DM, Curley JP. Effects of damage and redundancy on structural reliability. Journal of structural engineering. 1987; 113(7): 1533-49.
- [3] Farrar CR, Worden K. An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2007; 365 (1851): 303-15.
- [4] Frangopol DM, Liu M. Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost*.

- Mechanical Systems and Signal Processing. 2004; 18(1): 59-78.
- [18] Khatir S, Belaidi I, Serra R, Wahab MA, Khatir T. Retraction: Numerical study for single and multiple damage detection and localization in beam-like structures using BAT algorithm. *Journal of Vibroengineering*. 2017; 19(8): 6519-20.
- [19] Xu HJ, Liu JK, Lv ZR. Structural damage identification based on modified Cuckoo Search algorithm. *Structural engineering and mechanics: An international journal*. 2016; 58(1): 163-79.
- [20] Huang JL, Lu ZR. BB-BC optimization algorithm for structural damage detection using measured acceleration responses. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*. 2017; 64(3): 353-60.
- [21] Kaveh A, Dadras A. Structural damage identification using an enhanced thermal exchange optimization algorithm. *Engineering Optimization*. 2018; 50(3): 430-51.
- [22] Dabbagh H, Ghodrati Amiri G, Shaabani S. Modal data-based approach to structural damage identification by means of imperialist competitive optimization algorithm. *Scientia Iranica*. 2018; 25(3): 1070-82.
- [23] Chen C, Yu L. A hybrid ant lion optimizer with improved Nelder–Mead algorithm for structural damage detection by improving weighted trace lasso regularization. *Advances in Structural Engineering*. 2020; 23(3): 468-84.
- [24] Su Y, Liu L, Lei Y. Structural damage identification using a modified directional bat algorithm. *Applied Sciences*. 2021; 11(14): 6507.
- [25] Li YY. Hypersensitivity of strain-based indicators for structural damage identification: A review. *Mechanical systems and signal processing*. 2010; 24(3): 653-64.
- [26] Wang S, Xu M. Modal strain energy-based structural damage identification: a review and comparative study. *Structural Engineering International*. 2019; 29(2): 234-48.
- [27] Cornwell P, Doebling SW, Farrar CR. Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures. *Journal of sound and vibration*. 1999; 224(2): 359-74.
- [28] Li H, Yang H, Hu SL. Modal strain energy decomposition method for damage localization in 3D frame structures. *Journal of engineering mechanics*. 2006; 132(9): 941-51.
- [29] Cha YJ, Buyukozturk O. Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015; 30(5): 347-58.
- [30] Kaveh A, Zolghadr A. Guided modal strain energy-based approach for structural damage identification using tug-of-war optimization Structure and infrastructure engineering. 2007; 3(1): 29-41.
- [5] Adams D. Health monitoring of structural materials and components: methods with applications. John Wiley & Sons. 2007.
- [6] Park S, Yun CB, Roh Y, Lee JJ. PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components. *Smart Materials and Structures*. 2006; 15(4): 957.
- [7] Farrar CR, Doebling SW, Nix DA. Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2001; 359(1778): 131-49.
- [8] Rens KL, Wipf TJ, Klaiber FW. Review of nondestructive evaluation techniques of civil infrastructure. *Journal of performance of constructed facilities*. 1997; 11(4): 152-60.
- [9] McCann DM, Forde MC. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *Ndt & E International*. 2001; 34(2): 71-84.
- [10] Kong X, Cai CS, Hu J. The state-of-the-art on framework of vibration-based structural damage identification for decision making. *Applied Sciences*. 2017; 7(5): 497.
- [11] Moughty JJ, Casas JR. Vibration based damage detection techniques for small to medium span bridges: A review and case study. In *Proceedings of the 8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016)*, Bilbao, Spain. 2016; 5-8.
- [12] Manoach E, Warminski J, Kloda L, Teter A. Vibration based methods for damage detection in structures. In *MATEC Web of Conferences*. 2016; 83: 05007.
- [13] Avci O, Abdeljaber O, Kiranyaz S, Hussein M, Gabbouj M, Inman DJ. 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*. 2021; 147: 107077.
- [14] Wang DJ, Tan ZC, Li Y, Liu Y. Review of the application of finite element model updating to civil structures. In *Key Engineering Materials*. 2014; 574: 107-115.
- [15] Alkayem NF, Cao M, Zhang Y, Bayat M, Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey. *Neural Computing and Applications*. 2018; 30: 389-411.
- [16] Yang YB, Chen YJ. A new direct method for updating structural models based on measured modal data. *Engineering Structures*. 2009; 31(1): 32-42.
- [17] Kim GH, Park YS. An improved updating parameter selection method and finite element model update using multiobjective optimisation technique.

- algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2017; 31(4): 04017016.
- [31] Huang M, Li X, Lei Y, Gu J. Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced Moth-Flame optimization. In *Structures* 2020; 28: 1119-1136.
- [32] Vo-Duy T, Ho-Huu V, Dang-Trung H, Nguyen-Thoi T. A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm. *Composite Structures*. 2016; 147: 42-53.
- [33] Seyedpoor SM, Montazer M. A damage identification method for truss structures using a flexibility-based damage probability index and differential evolution algorithm. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2016; 24(8): 1303-22.
- [34] Fan Q. A two-step damage identification based on cross-model modal strain energy and simultaneous optimization. In *IOP conference series: earth and environmental science*. 2021; 643(1): 012145.
- [35] Abbasnia R, Mirzaei B, Yousefbeck S. A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams. *Journal of Vibroengineering*. 2016; 18(3): 1497-513.
- [36] Mirzaei B, Nasrollahi K, Yousefbeck S, Ghodrati Amiri G, Zare Hosseinzadeh A. A two-step method for damage identification and quantification in large trusses via wavelet transform and optimization algorithm. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 2019; 7(1): 1-20.
- [37] Allemang RJ. A correlation coefficient for modal vector analysis. In *Proc. of the 1st IMAC*. 1982; 110-116.
- [38] Udwardia FE. Structural identification and damage detection from noisy modal data. *Journal of Aerospace Engineering*. 2005; 18(3): 179-87.
- [39] Faramarzi A, Heidarinejad M, Stephens B, Mirjalili S. Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*. 2020; 191: 105190.
- [40] Seyedpoor S. A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2012; 47(1): 1-8.
- [41] Koh BH, Dyke SJ. Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data. *Computers & structures*. 2007; 85(3-4): 117-30.
- [42] Moradi Pour P. *An improved modal strain energy method for bridge damage identification* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology). 2020.