

روش به روزرسانی ارتعاش-محور برای سلامت سنجی سازه ها با کمک الگوریتم بهینه یاب پروانه-شعله

سید علی سید رزاقی^{۱*}، بهادر عادل سنجیده^۲، غلامرضا قدرتی امیری^۳، علی زارع حسین زاده^۴

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران،

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

۴- کارشناس ارشد مهندسی عمران-مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

arazzaghi@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۸/۲۲]

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۵]

چکیده

در این مقاله یک رویکرد جدید به روزرسانی مدل برای سلامت سنجی و تعیین محل و شدت آسیب در سازه های مهندسی ارائه می شود. به این منظور، یک تابع هدف حساس به رخداد آسیب برپایه ی تابع خطای مستقیم با کمک روش هماهنگی نقطه ای و به کارگیری اطلاعات مودال سازه ی آزمایش شده و مدل تحلیلی آن معرفی می شود. در این تابع هدف، اطلاعات مودال (بسامدهای طبیعی و شکل های مود متناظر) به صورت مستقیم و بدون واسطه ترکیب می شوند که این امر سهولت ارزیابی تابع هدف و حساسیت زیاد آن به رخداد آسیب را به دنبال دارد. به منظور یافتن جواب بهینه مسئله که همان آسیب های شناسایی شده در سازه است، از الگوریتم بهینه یابی پروانه-شعله استفاده می شود. الهام بخش اصلی این الگوریتم، همگرایی مارپیچ پروانه ها به سمت شعله های مصنوعی است. به روزرسانی موقعیت پروانه ها نسبت به شعله ها که بهترین جواب های بدست آمده در طول تکرارها هستند، احتمال همگرایی زودرس به نقاط بهینه ی محلی را کاهش داده، همگرایی الگوریتم به نقطه ی اکسترمم کلی را تضمین می نماید. کارایی روش پیشنهادی با مطالعه ی سه نمونه عددی که شامل یک قاب برشی هفت طبقه، یک تیر ساده و یک خرپای دو بعدی است، ارزیابی می شود. در این مطالعه هر کدام از سازه ها با روش اجزای محدود مدل سازی شده و آسیب با کاهش سختی در عضوهای آسیب دیده، شبیه سازی می شود. هم چنین اثر وجود نوفه تصادفی در داده های ورودی بر روی عملکرد روش پیشنهادی بررسی می شود. نتایج به دست آمده عملکرد خوب و پایدار روش مطرح شده را برای شناسایی آسیب نشان می دهد.

واژگان کلیدی: شناسایی آسیب، اطلاعات مودال، تابع هدف، هماهنگی نقطه ای، بهینه یاب پروانه-شعله.

۱- مقدمه

است گسترش یابد و عملکرد سازه را به طور منفی تحت تأثیر قرار دهد و حتی در مواردی ممکن است تلفات جانی و مالی وسیعی را به بار آورد. شناسایی زود هنگام آسیب می تواند از بروز حوادث این چنینی جلوگیری کند و عملیات بهسازی را

سازه های مهندسی در طول عمر خود ممکن است به دلایل طبیعی یا غیرطبیعی دچار آسیب^۱ شوند. این آسیب ممکن

1 Damage

هدفمندتر سازد. از این رو روش‌های متنوعی برای شناسایی محل و یا شدت آسیب سازه‌ای ارائه شده است. با توجه به ماهیت مسئله‌ی شناسایی آسیب، می‌توان آن را به‌صورت یک فرآیند به‌روزرسانی مدل پایه تعریف کرد. چراکه آسیب باعث تغییراتی در مشخصات فیزیکی سازه می‌شود و از دیدگاه ریاضی، این تغییرات را می‌توان به‌صورت نوساناتی در مشخصات فیزیکی سازه‌ی اولیه تعریف نمود [1]. در دسته‌ای از روش‌ها، مسئله‌ی به‌روزرسانی به صورت مسئله‌ی بهینه‌یابی تعریف و با کمک الگوریتم‌های بهینه‌یابی حل می‌شود [2-13]. در این روش‌ها، یک مدل تحلیلی (با فرض آسیب مجهول در تمامی المان‌های سازه‌ای) بر پایه‌ی تئوری اجزای محدود¹ ایجاد می‌شود. فرضیه‌ها و پارامترهای² مدل تحلیلی باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که پاسخ‌های مدل تحلیلی به‌تدریج به پاسخ‌های متناظر ثبت شده (یا استخراج شده) از سازه آزمایش شده نزدیک شوند، که برای این منظور باید تابع هدفی³ حساس به آسیب معرفی و با کمک الگوریتم‌های بهینه‌یابی حل شود. توابع هدف می‌تواند به سه دسته‌ی کلی، توابع هدف بر پایه‌ی بسامدهای طبیعی⁴، توابع هدف بر پایه‌ی شکل‌های مود⁵ و توابع هدف بر پایه‌ی استفاده‌ی هم‌زمان و ترکیب بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود تقسیم شود. سادا و همکارانش [10] با در نظرگیری تغییرات بسامد طبیعی به‌عنوان پارامتر حساس به آسیب، مسئله‌ی شناسایی آسیب را به‌عنوان یک مسئله‌ی معکوس تعریف، و با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام جمعیت⁶ آسیب را در تیرها شناسایی کردند. نوری شیرازی و همکاران [12] با محاسبه‌ی چند بسامد طبیعی اول سازه قبل و بعد از رخداد آسیب و با به‌کارگیری یک بهینه‌یابی چندمرحله‌ای سازگار بر پایه‌ی الگوریتم ازدحام جمعیت اصلاح شده، آسیب سازه‌ای را از طریق حل مسئله‌ی معکوس⁷ شناسایی کردند. استفاده از تغییرات بسامد طبیعی برای شناسایی آسیب از نظر بحث‌های اجرایی مقرون به‌صرفه است؛ چراکه

بسامدهای طبیعی به‌راحتی و با نصب دست‌کم یک حس‌گر⁸ در یک نقطه‌ی قابل دسترس روی سازه، قابل تخمین هستند و حساسیت کمتری به نوفه⁹ دارند. ولی تغییرات بسامد طبیعی در اثر آسیب بسیار کم است پس دقت شناسایی آسیب در این دسته از روش‌ها پایین است؛ تا جایی که آسیب‌های سازه‌ای جزئی را نمی‌توان با بررسی تغییرات بسامد طبیعی تشخیص داد.

چا و همکارش [14] از یک الگوریتم ژنتیک¹⁰ چندهدفه ترکیبی و انرژی کرنشی مودال¹¹ برای شناسایی محل و شدت آسیب‌های کوچک در سازه‌های فولادی استفاده کردند. سیدپور و همکارش [15] برای شناسایی آسیب چندگانه در سیستم‌های خرابایی از یک شاخص احتمال آسیب بر پایه‌ی نرمی و الگوریتم تکاملی تفاضل¹² استفاده کردند. آن‌ها برای حل مسئله‌ی معکوس، شکل‌های مودی را به‌عنوان پارامتر حساس به آسیب برگزیدند. شکل مود نسبت به بسامد طبیعی حساسیت کمتری به آثار محیطی مانند دما دارد ولی از طرفی حساسیت بیشتری به وجود نوفه دارد [16]. حسین زاده و همکاران [17] روشی برای شناسایی آسیب در سازه‌های مهندسی با استفاده از جابه‌جایی استاتیکی تخمین زده‌شده با ماتریس نرمی و الگوریتم بهینه‌یاب کوکو¹³ معرفی کردند. ماتریس نرمی امکان استفاده‌ی تلفیقی از بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی را فراهم می‌آورد و بر همین اساس، انتظار می‌رود که روش‌های مبتنی بر ماتریس نرمی، حساسیت مناسبی به طیف وسیعی از آسیب‌های جزئی و شدید داشته باشد. مهریان و همکاران [18] برای شناسایی آسیب دو تابع هدف - یکی بر اساس ماتریس نرمی و دیگری بر اساس ترکیب بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود- ارائه دادند. آن‌ها از دو الگوریتم بهینه‌یاب ازدحام جمعیت، و جست‌وجوی سیستم باردار¹⁴ برای کمینه کردن توابع هدف استفاده و نتایج را باهم مقایسه کردند.

1 Finite element theory

2 Parameters

3 Cost function

4 Natural frequency

5 Mode shape

6 Particle swarm optimization

7 Inverse problem

8 Sensor

9 Noise

10 Genetic algorithm

11 Modal strain energy

12 Differential evolution algorithm

13 Cuckoo optimization algorithm

14 Charged system search

های کلیدی دیگر این الگوریتم، «شعله‌ها» هستند که بیانگر متغیرهای موجود در مسئله بوده؛ مشابه با پروانه‌ها تولید می‌شود و برای هر کدام از آن‌ها نیز مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. درواقع پروانه‌ها و شعله‌ها هر دو جواب هستند و تفاوت اصلی بین این دو، چگونگی برخورد و بروزرسانی آن‌ها در هر تکرار است. پروانه‌ها عوامل اصلی جست‌وجو^۴ هستند که پیرامون فضای جست‌وجو^۵ حرکت می‌کنند، درحالی که شعله‌ها بهترین موقعیت یافته‌شده توسط پروانه‌ها تا تکرار حال حاضر است. به بیان دیگر، شعله‌ها را می‌توان به‌عنوان پرچم‌ها یا پین^۶‌هایی در نظر گرفت که توسط پروانه‌ها هنگام بررسی فضای جست‌وجو افتاده‌اند. بنابراین، هر پروانه اطراف یک پرچم (شعله) را جست‌وجو می‌کند و به‌منظور یافتن جوابی بهتر، آن را بروزرسانی می‌کند. با این سازوکار، یک پروانه هرگز بهترین جواب یافت شده خود (بهترین شعله متناظرش) را از دست نمی‌دهد. علت اختصاص یک شعله خاص به هر پروانه در این الگوریتم (که به احتمال زیاد مشابه رفتار واقعی پروانه‌ها در طبیعت نیست) جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم در نقاط اکسترمم نسبی است. هم‌چنین، تمایل دائمی پروانه‌ها برای بروزرسانی موقعیت خود نسبت به شعله‌ها، همگرایی الگوریتم پروانه-شعله را تضمین می‌کند [19]. بدین ترتیب، هدف شناسایی موقعیت (شعله) بهتر در فضای جست‌وجو نسبت به موقعیت‌های خوب قبلی است تا زمانی که معیار توقف ارضا شود.

۳- روش پیشنهادی

تابع هدف پیشنهادی در این مقاله برپایه بررسی اطلاعات مودال استوار است و در آن از ترکیب مستقیم و بدون واسطه بسامد طبیعی و شکل مودی استفاده می‌شود. این روش بر اساس مینیمم‌سازی تابع خطا رابطه‌بندی شده است و با کمک هماهنگی نقطه‌ای قابل پیاده‌سازی است. در رویکرد هماهنگی نقطه‌ای، میزان اختلاف بین مولفه‌های یک پارامتر دلخواه در دو حالت مختلف (که یکی حالت مبنا و دیگری حالت متغیر

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، زمانی که تابع هدف بر اساس ترکیب بسامد طبیعی و شکل مود تعریف می‌شود، عملکرد خوبی داشته و نقص‌های اشاره‌شده در استفاده‌ی تکی از بسامد طبیعی یا شکل مودی کمتر دیده می‌شود. در این نوشتار شکل جدیدی از این ترکیب ارائه می‌شود که در آن به‌جای تلفیق ناصریح اطلاعات مودال (مانند توابع هدف مبتنی بر ماتریس نرمی، بردار نیروی باقی‌مانده‌ی مودال و ...، که نمود پنهانی از ترکیب اطلاعات مودال را ارائه می‌دهند)، بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود به‌طور مستقیم و بی‌واسطه ترکیب می‌شوند. سادگی پیاده‌سازی و کاهش اثرات نوفه‌ی تصادفی در داده‌های اندازه‌گیری شده، ازجمله مزایای استفاده‌ی مستقیم از داده‌های مودال است. تابع هدف پیشنهاد شده، بر پایه‌ی روش هماهنگی نقطه‌ای^۱ استوار است. در ادامه، برای حل مسئله بهینه‌یابی از الگوریتم بهینه‌یابی پروانه-شعله^۲ [19] استفاده شده است. این الگوریتم از رفتار پروانه‌ها هنگام حرکت در طبیعت الهام گرفته شده است و در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی^۳ سرعت همگرایی بالایی دارد. به‌منظور بررسی کارآیی روش پیشنهادی، ۳ نمونه عددی شامل یک قاب برشی ۷ طبقه، یک تیر ساده‌ی ۱۰ عضوی و یک خرپای دو بعدی ۲۹ عضوی، بررسی شده است. هم‌چنین، آثار وجود نوفه تصادفی در داده‌های ورودی (بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی) با اعمال دو شدت نوفه متفاوت مطالعه شده است.

۲- الگوریتم بهینه‌یابی

الگوریتم بهینه‌یابی مورد استفاده در این مقاله، الگوریتم بهینه‌یابی پروانه-شعله [19] است. فلوچارت کلی این الگوریتم در شکل (۱) نشان داده شده است. این الگوریتم با الهام از طبیعت مطرح شده و جزء الگوریتم‌های تکاملی دسته‌بندی می‌شود. همگرایی مارپیچ پروانه‌ها به سمت شعله‌های مصنوعی الهام‌بخش اصلی این الگوریتم است. این الگوریتم کار خود را با اتخاذ تعدادی جمعیت اولیه تحت عنوان «پروانه‌ها» آغاز می‌کند و مقدار تابع هدف برای هر پروانه محاسبه می‌شود. مولفه-

4 Exploration
5 Search space
6 pin

1 Point matching method
2 Moth-flame optimization
3 Evolutionary algorithm

در این رابطه، d بردار شدت آسیب‌های مجهول است. d_i برابر با یک به معنی آسیب کامل در عضو، و d_i برابر با صفر بیانگر سالم بودن عضو است. در ادامه، تابع هدف با الگوریتم بهینه‌یابی پروانه-شعله حل و پاسخ‌های بهینه‌ی مسئله به‌عنوان آسیب(های) شناسایی شده معرفی می‌شوند.

شکل ۱. فلوچارت بهینه‌یاب پروانه-شعله.

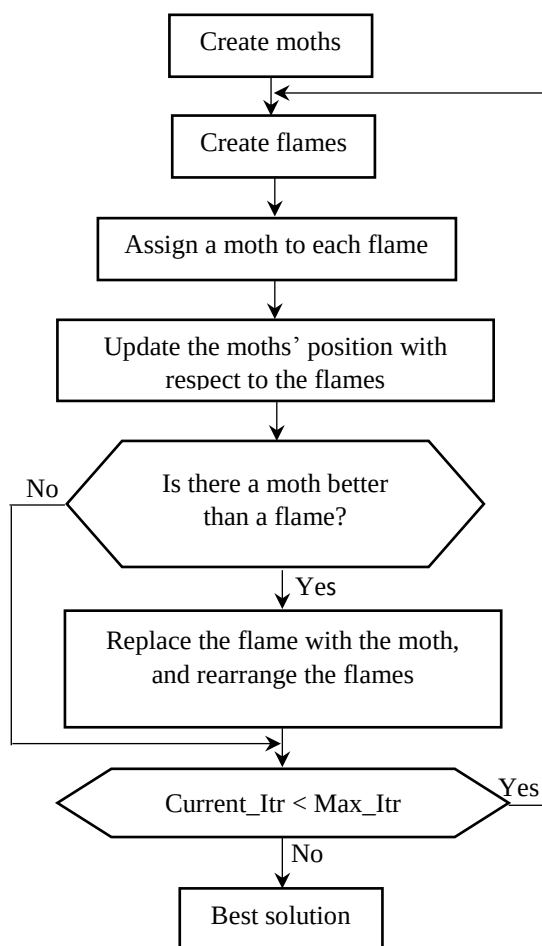


Fig. 1. Flowchart of the Moth-flame optimization.

۴- مطالعات عددی

در این بخش به ارزیابی روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب در سازه‌های مهندسی پرداخته می‌شود. برای این منظور، ۳ نمونه عددی با الگوهای آسیبی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای هر کدام نتایج شناسایی آسیب همراه با نمودارهای هم‌گرایی در حالت ایده‌آل و وجود نوفه‌ی تصادفی ارائه می‌شود. هم‌چنین، اثر تعداد جمعیت اولیه، و تعداد تکرار روی روش پیشنهادی بررسی می‌شود. در این مطالعات فرض می‌شود که تنها ۳ مود اول ارتعاش برای شناسایی آسیب در

است) بررسی می‌شود. مطلوب مسئله زمانی تحویل می‌شود که مولفه‌های متناظر با حالت متغیر به‌گونه‌ای انتخاب شود که اختلاف مذکور، به سمت صفر میل کند. در روش پیشنهادی، رویکرد مذکور برای بررسی بردارهای شکل مودی استفاده می‌شود و نسبت بسامدهای طبیعی به‌عنوان ضریب همسان‌ساز دو حالت مبنا و متغیر تعریف می‌شود. تابع هدف پیشنهادی به‌صورت زیر است:

$$E \{d_1, d_2, \dots, d_{Ne}\} = \sum_{j=1}^m \|\gamma_j (\varphi_j^d - \varphi_j^a)\|, \quad \gamma_j = \frac{(\omega_j^d)^2}{(\omega_j^a)^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $\|\cdot\|$ نشان دهنده نرم اقلیدسی^۱، $(\omega_j^d)^2$ و $(\omega_j^a)^2$ به‌ترتیب بیانگر مقدار ویژه زام سازه‌ی آزمایش‌شده (آسیب‌دیده) و مدل تحلیلی است. هم‌چنین، φ_j^d و φ_j^a به ترتیب بردار شکل مود زام سازه‌ی آسیب‌دیده و مدل تحلیلی، ضرایب d_1 تا d_{Ne} ضرایب مجهول آسیب برای المان‌های اول تا Ne ، و m تعداد مود^۲ در نظر گرفته شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این تابع برای شناسایی آسیب فقط به اطلاعات مودال سازه‌ی آسیب دیده (که از طریق آنالیز پاسخ‌های ثبت شده از آزمایش سازه، قابل استخراج هستند) نیاز دارد.

در این مقاله، آسیب به‌صورت کاهش سختی عضوهای آسیب‌دیده شبیه‌سازی می‌شود:

$$K_j^d = (1 - d_j) \times K_j \quad (2)$$

که K_j ماتریس سختی عضو زام در حالت سالم و K_j^d ماتریس سختی عضو زام در حالت آسیب دیده است. با توجه به این‌که شدت آسیب هر عضو عددی بین صفر و ۱ است، مسئله تشخیص آسیب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

(۳)

$$\text{find } d = \{d_1, d_2, \dots, d_{Ne}\}^T \Rightarrow \text{minimize } E \{d_1, d_2, \dots, d_{Ne}\}$$

$$\text{subject to } 0 \leq d_i \leq 1$$

1 Euclidean norm

2 Mode

محاسبات و مدل‌سازی‌ها در فضای نرم‌افزار متلب^۱ انجام می‌گیرد.

جدول ۱. الگوهای آسیب قاب برشی.

Case1		Case2	
Element	Damage	Element	Damage
3	10%	3	5%
		6	10%

Table. 1. Damage patterns in the shear frame.

سپس، شدت آسیب احتمالی در تمامی عضوهای سازه‌ای با روند پیشنهادی محاسبه می‌شود. شدت آسیب خیلی کوچک (نزدیک به صفر) حاکی از سالم بودن کامل عضو متناظر خواهد بود. شدت آسیب غیرصفر نیز بیانگر میزان آسیب رخ داده در عضو مورد مطالعه است.

افزایش تعداد و شدت خرابی‌ها در سازه می‌تواند باعث تغییر در رفتار دینامیکی سازه‌های سالم و آسیب‌دیده شود به طوری که ترتیب شکل مدهای به‌دست‌آمده از آزمایش محلی با روش تحلیلی متفاوت باشد. به منظور کنترل این مورد، پیش از پیاده‌سازی روش پیشنهادی، هماهنگی هندسی شکل‌مدها با استفاده از معیار اطمینان مودال $MAC^{[16]}$ کنترل می‌شود. MAC برابر با ۱ به معنی هماهنگی هندسی کامل، و برابر با صفر بیانگر عدم هماهنگی هندسی دو بردار است. منظور از هماهنگی هندسی، پروفیل عمومی بردار شکل‌مودی در حالات سالم و آسیب‌دیده است. نتایج مربوط به این مطالعه، در جدول (۲) آورده شده‌است. مشاهده می‌شود که مقدار MAC ، در هر دو الگوی آسیب، برای تمامی مدها برابر با ۱ و یا بسیار نزدیک به ۱ است، که این مسئله نشان‌دهنده این‌است که ترتیب شکل‌های مودی استخراج‌شده برای سازه‌ی آسیب‌دیده با ترتیب آن‌ها برای سازه‌ی سالم، یکسان است.

جدول ۲. معیار اطمینان مودال برای کنترل ترتیب مدهای استخراج شده در قاب برشی.

	Case 1			Case 2		
	Mode1	Mode2	Mode3	Mode1	Mode2	Mode3
MAC	1.000	1.000	0.9981	1.000	0.9992	0.9986

Table. 2. MAC values to control the sequence of the extracted modes in the shear frame.

دسترس است، پارامترهای الگوریتم بهینه‌یابی نیز به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

تعداد جمعیت اولیه = ۲۰۰، تعداد تکرار = ۶۰۰.

انتخاب این اعداد به‌عنوان پارامترهای الگوریتم، بر حسب ماهیت مسئله و با آزمون و خطا صورت پذیرفته‌است. لازم به گفتن است که برای سازه‌های ساده‌تر می‌توان با استفاده از تعداد مود کمتری شناسایی آسیب را انجام داد، ولی در سازه‌های پیچیده‌تر این امر سبب کاهش دقت شناسایی آسیب می‌شود. این مسئله در نمونه عددی سوم با جزئیات بیشتری تشریح شده است.

۱-۴- قاب برشی هفت طبقه

شکل (۲) یک قاب برشی هفت طبقه را نشان می‌دهد که دارای هفت درجه‌ی آزادی انتقالی است و مشخصات آن به صورت زیر است:

سختی: $K_i = 375 \text{ KN} / \text{m}$, $i = 1, 2, 3, \dots, 7$

$M_i = 3.78 \text{ kg}$, $i = 1, 2, 3, \dots, 6$

جرم: $M_7 = 3.31 \text{ kg}$

شکل ۲. قاب برشی هفت طبقه.

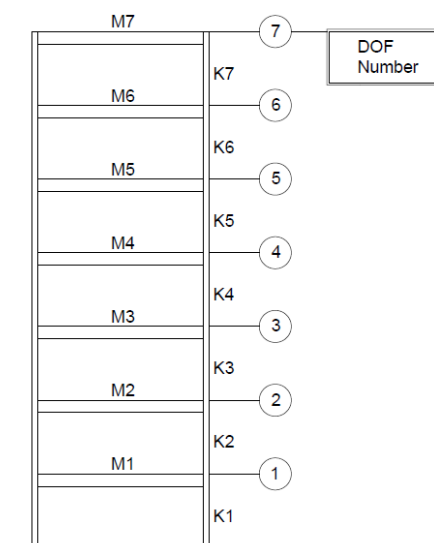


Fig. 2. Seven-story shear frame.

به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، اطلاعات مودال سازه‌ی آسیب‌دیده (به‌عنوان اطلاعات استخراج‌شده از سازه‌ی آزمایش‌شده)، با در نظر گرفتن دو الگوی آسیب معرفی شده در جدول (۱)، محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی

1 MATLAB software

2 Modal assurance criterion

نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش شناسایی آسیب برای حالتی که اطلاعات ثبت شده از سازه‌ی آسیب‌دیده فاقد نوفه است در شکل‌های (۳-الف و ۴-الف) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی برای هر دو الگوی آسیب علاوه بر محل، شدت آسیب را نیز با دقت بالایی تشخیص می‌دهد. هم‌چنین به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی و عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری، علاوه بر بررسی حالت ایده‌آل حالت «وجود نوفه تصادفی در داده‌های ورودی» نیز بررسی می‌شود. در این مقاله نوفه تصادفی با استفاده از رابطه‌های زیر، هم در بسامدهای طبیعی و هم در شکل‌های مودی، لحاظ می‌شود:

$$\omega_i^n = \omega_i (1 + \kappa \theta_i) \quad (4)$$

$$\varphi_i^n = \varphi_i (1 + \varepsilon \eta_i) \quad (5)$$

که ω_i^n و φ_i^n به ترتیب بسامد طبیعی و شکل مودی i ام با نوفه، ω_i و φ_i به ترتیب بسامد طبیعی و شکل مودی i ام بدون نوفه، κ و ε به ترتیب شدت نوفه‌ی اعمال شده بر بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی، و θ_i و η_i به ترتیب عدد و بردار تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی [۱-] هستند که با نرم افزار متلب تولید می‌شوند.

دو حالت نوفه طبق جدول (۳) روی داده‌های ورودی اعمال می‌شود.

جدول ۳. جزییات نوفه.

Noise	ε	κ
N1	3%	1%
N2	5%	3%

Table 3. Noise details.

نتایج شناسایی آسیب برای دو حالت نوفه‌ی ذکر شده در جدول (۳)، در شکل‌های (۳-ب و ۴-ب)، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که روش پیشنهادی در حالت وجود نوفه نیز توانایی شناسایی آسیب با دقت مناسب را دارد. با

اعمال شدت‌های نوفه‌ی حالت دوم، عضوهای سالم بیش‌تری به اشتباه آسیب‌دیده تشخیص داده می‌شود، که این مسئله با توجه به شدت کم آسیب گزارش شده در این اعضا، مشکلی در نتیجه‌گیری و قضاوت ایجاد نمی‌کند. برای نوفه‌ی N1 حداکثر میزان خطای نسبی در الگوی آسیب اول برابر ۱.۵٪ و در الگوی آسیب دوم برابر ۱۵٪ است. هم‌چنین برای نوفه‌ی N2، بیشینه میزان خطای نسبی در الگوی آسیب اول ۱۰.۹٪ و در الگوی آسیب دوم ۲۵٪ است. بنابراین نتایج بدست‌آمده برای شدت‌های نوفه حالت اول و دوم، نشان دهنده‌ی توانایی بالای روش برای شناسایی آسیب سازه‌ای و پایداری تابع هدف پیشنهادی در برابر وجود نوفه تصادفی در داده‌های ورودی است.

در ادامه برای بررسی هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌یابی، منحنی-های هم‌گرایی در سه حالت بدون نوفه، نوفه‌ها N1 و N2 در شکل‌های (۵-الف و ۵-ب) نشان داده شده است.

با بررسی این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که تابع هدف پیشنهادی در حالت بدون نوفه به صفر مطلق هم‌گرا می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به رابطه‌ی (۱)، مقدار کمینه‌ی تابع هدف پیشنهادی برابر صفر مطلق است. پس، از نظر فیزیکی، هم‌گرا شدن تابع هدف به صفر مطلق به معنی به روزرسانی دقیق مدل مبنا است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که در هر سه حالت بدون نوفه، نوفه‌ی N1، و نوفه‌ی N2 روش دارای هم‌گرایی سریع است و قبل از تکرار حدودا ۵۰-ام به عددی ثابت هم‌گرا می‌شود.

هم‌گرایی سریع از این نظر مهم است که می‌تواند عاملی برای بررسی قوت الگوریتم بهینه‌یابی در حل مسئله‌ی معکوس در فضای پاسخ پیچیده باشد. به این معنا که هم‌گرایی سریع به عددی ثابت نمایان‌گر قدرت روش در شناسایی سریع نقطه‌ی اکسترمم مطلق است. با در نظر داشتن این نکته، نتایج نشان‌داده شده در شکل (۵) حاکی از آن است که الگوریتم بهینه‌یابی به کار برده شده در این مقاله، الگوریتمی مناسب برای حل مسئله‌ی معکوس شناسایی آسیب است.

شکل ۳. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۱ در قاب برشی الف- بدون نوفه ب- با نوفه.

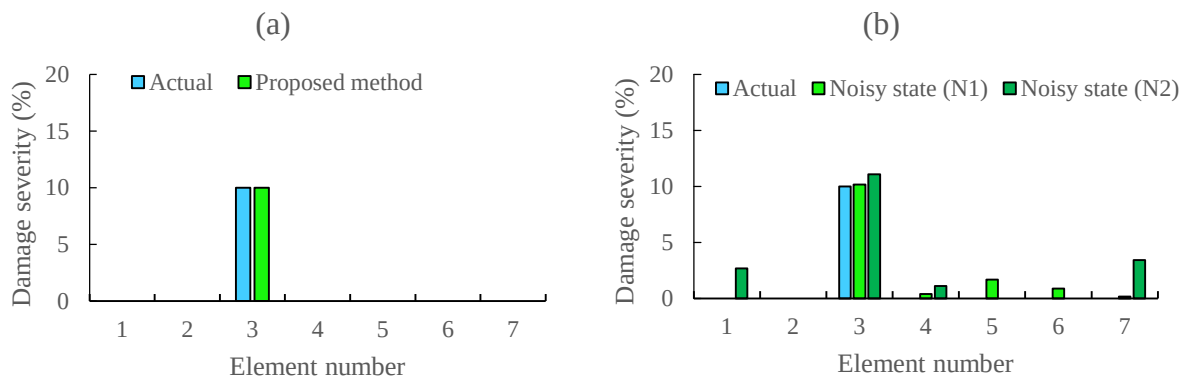


Fig. 3. Damage identification results for damage case 1 in shear frame (a) without noise (b) with noise.

شکل ۴. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۲ در قاب برشی الف- بدون نوفه ب- با نوفه.

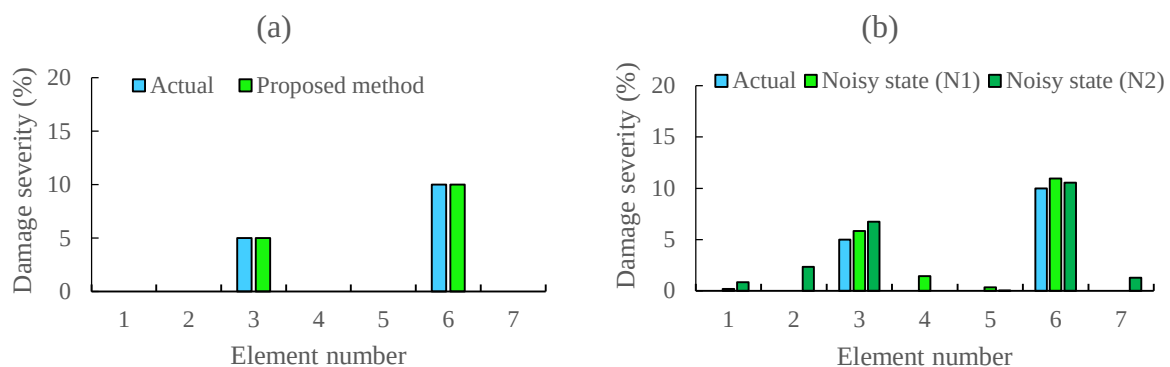


Fig. 4. Damage identification results for damage case 2 in shear frame (a) without noise (b) with noise.

شکل ۵. منحنی‌های همگرایی الف- الگوی آسیب ۱ ب- الگوی آسیب ۲، در قاب برشی.

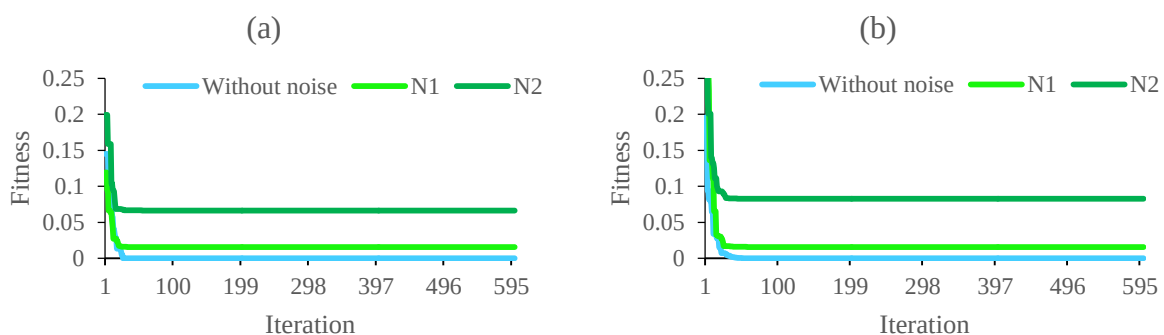


Fig. 5. Convergence curves for (a) case 1 (b) case 2, in shear frame.

۲-۴- تیر ساده با ۱۰ عضو

W12x65 بوده که مساحت و ممان اینرسی آن به ترتیب برابر با 123.2 cm^2 و 22.185 cm^4 است. به منظور بررسی و ارزیابی روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب در این تیر، دو الگوی آسیب تک‌گانه و سه‌گانه مطابق جدول (۴) در نظر گرفته می‌شود.

در دومین مطالعه عددی، یک تیر دو سر ساده با ۱۰ عضو بررسی می‌شود. مدل اجزای محدود این تیر در شکل (۶) نشان داده شده است. چگالی و مدول کشسانی این تیر به ترتیب برابر با 7850 kg/m^3 و 200 GPa است. مقطع تیر

جدول ۵. معیار اطمینان مودال برای کنترل ترتیب موده‌های استخراج شده

در تیر.

Case 1			Case 2		
Mode1	Mode2	Mode3	Mode1	Mode2	Mode3
MAC	0.9997	0.9993	0.9999	0.9998	0.9994

Table 5. MAC values to control the sequence of the extracted modes in beam.

نتایج شناسایی آسیب در این تیر در حالت عدم وجود نوفه، به ترتیب در شکل‌های (۷-الف و ۸-الف) و در حالت وجود نوفه به ترتیب در شکل‌های (۷-ب و ۸-ب)، نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تابع هدف پیشنهادی نسبت به رخداد آسیب حساسیت زیادی دارد و قادر است محل آسیب را تشخیص و شدت آن را با دقت بالایی (بدون خطا در حالت ایده‌آل) (بدون نوفه) تشخیص دهد. هم‌چنین در حالت وجود نوفه تصادفی نیز نتایج قابل قبولی برای شناسایی آسیب گزارش شده است. نتایج برای نوفه حالت اول نسبت به نوفه‌ی حالت دوم دقیق‌تر است؛ چرا که شدت‌های نوفه حالت اول کمتر است. برای نوفه حالت دوم نیز در هر دو الگوی آسیب محل اعضای آسیب‌دیده و شدت آسیب‌های متناظر با خطای کمی تعیین می‌شود، که این قضیه بیانگر پایداری تابع هدف پیشنهادی در برابر شدت‌های نوفه زیاد است.

شکل ۶. مدل اجزای محدود تیر.

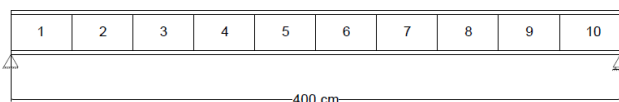


Fig. 6. Finite element model of beam.

لازم به توضیح است که پارامترهای الگوریتم بهینه‌یابی مشابه با مثال قبل اتخاذ می‌شوند و از سه مود اول ارتعاش برای شناسایی آسیب استفاده می‌شود. به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی و عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری، نوفه‌های تصادفی جدول (۳) روی داده‌های ورودی اعمال شده و توانایی روش برای شناسایی آسیب سازه‌ای در حالات با و بدون نوفه، بررسی می‌شود.

مشابه بخش (۲-۴)، قبل از پیاده‌سازی روش، ترتیب موده‌های استخراج شده در حالات آسیب‌دیده با ترتیب آنها در حالت سالم، مقایسه می‌شود (جدول ۵). مشاهده می‌شود که مقادیر MAC بسیار نزدیک به ۱ می‌باشد، از این‌رو رفتار دینامیکی سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده یکسان است.

جدول ۴. الگوهای آسیب تیر.

Case1		Case2	
Element	Damage	Element	Damage
4	20%	1	25%
		5	20%
		9	10%

Table 4. Damage patterns for beam.

شکل ۷. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۱ در تیر الف- بدون نوفه ب- با نوفه.

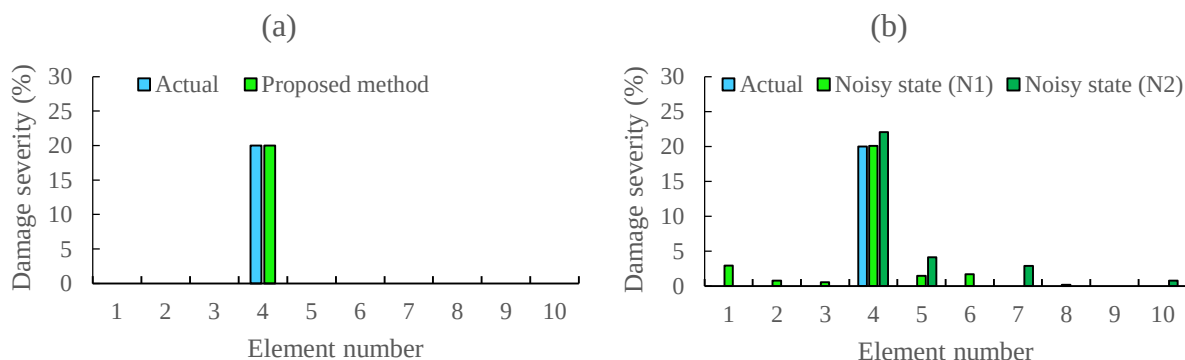


Fig. 7. Damage identification results for damage case 1 in beam (a) without noise (b) with noise.

شکل ۸. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۲ در تیر الف- بدون نوفه ب- با نوفه.

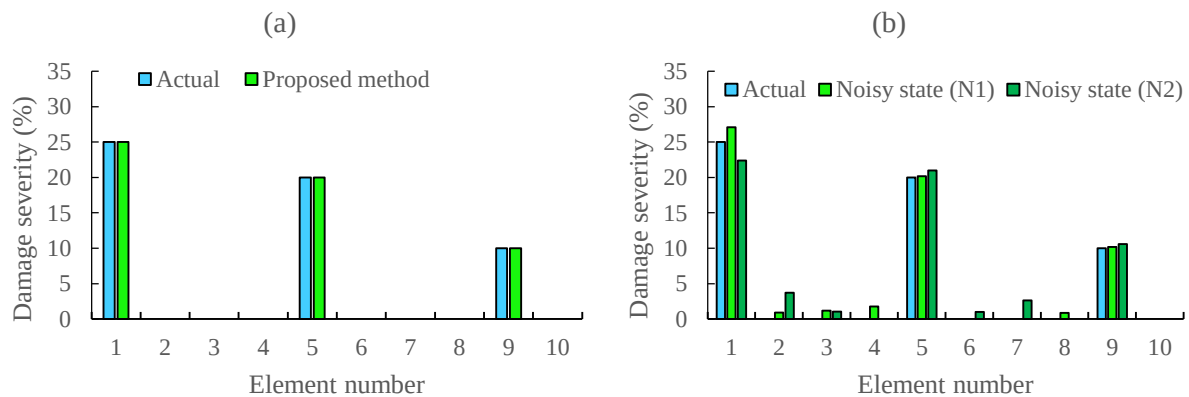


Fig. 8. Damage identification results for damage case 2 in beam (a) without noise (b) with noise.

شکل ۹. منحنی‌های همگرایی برای الف- الگوی آسیب ۱ ب- الگوی آسیب ۲ در تیر

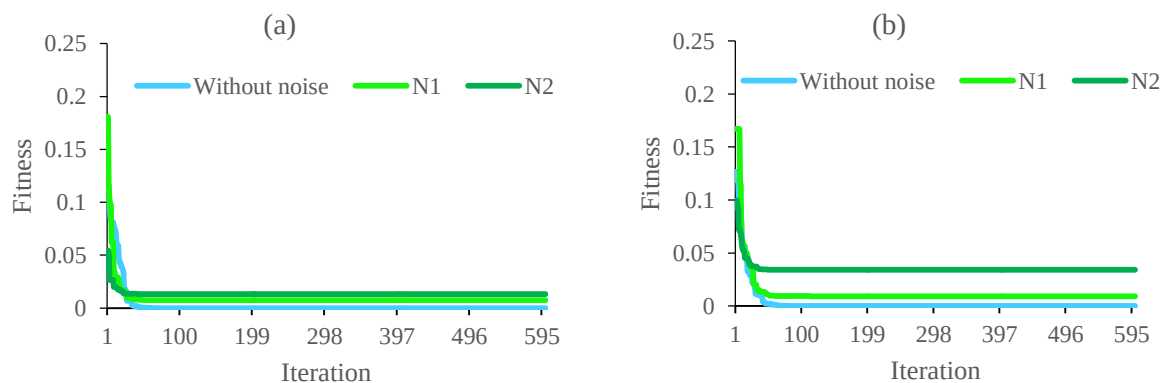


Fig. 9. Convergence curves for (a) case 1 (b) case 2 in beam.

۳-۴- خرابی دوبرای با ۲۹ عضو

سازه‌های خرابی به دلیل پیچیدگی در اتصالات و تعداد اعضایی که می‌توانند به هرگره متصل شوند، به‌عنوان سازه‌های پیچیده در نظر گرفته می‌شوند. از این‌رو سومین مطالعه‌ی عددی به شناسایی محل و شدت آسیب در یک خرابی صفحه‌ای اختصاص می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، این خرپا دارای ۲۹ المان بوده و هر گره‌ی آن دارای دو درجه‌ی آزادی می‌باشد، مدول کشسانی و چگالی این خرپا به‌ترتیب برابر با $E=200 \text{ GPA}$ و $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ است. جرم بر واحد طول و مساحت مقطع عرضی برای اعضای قائم به‌ترتیب $m=39.25 \text{ kg/m}$ و $A=0.005 \text{ m}^2$ ، برای اعضای افقی به‌ترتیب $m=78.5 \text{ kg/m}$ و $A=0.01 \text{ m}^2$ و برای اعضای قطری به‌ترتیب $m=62.80 \text{ kg/m}$ و $A=0.008 \text{ m}^2$ می‌باشد.

منحنی‌های همگرایی الگوهای آسیبی مطالعه شده در این نمونه، در شکل‌های (۹-الف و ۹-ب)، برای سه حالت بدون نوفه، نوفه‌ی N1 و نوفه‌ی N2 نشان داده شده‌اند. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که مشابه مثال قبلی، الگوریتم پیشنهادی قادر است تا در حدود ۵۰ تکرار در هر دو الگوی آسیب تک-گانه و سه‌گانه، در حالت بدون نوفه، به مقدار صفر مطلق همگرا شود. نکته‌ی قابل توجه این‌است که برای هر دو الگوی آسیب و در همه‌ی حالات مطالعه‌شده، از تکرار حدود ۱۰۰ به‌بعد، منحنی همگرایی ثابت می‌شود و با افزایش تعداد تکرار، تابع هدف به مقدار کم‌تری همگرا نمی‌شود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعداد تکرار برابر با ۶۰۰ کافی بوده، و در روش پیشنهادی همگرایی زودرس^۱ رخ نمی‌دهد.

1 Premature convergence

آسیب ۲) شناسایی آسیب با دقت بالا انجام می‌شود. نتایج بدست‌آمده برای وجود نوفه حالت اول و نوفه حالت دوم نیز بیانگر پایداری تابع هدف در برابر وجود نوفه در اطلاعات ورودی است. اگرچه بازهم تعدادی المان سالم در نوفه حالت دوم به‌اشتباه آسیب‌دیده تشخیص داده شده‌اند، شدت آسیب در این اعضا کم است؛ بنابراین مشکلی در نتیجه‌گیری و قضاوت پیش نمی‌آید. برای نوفه N1، بیشینه میزان خطای نسبی در الگوی آسیب اول برابر ۵/۹۲٪ و در الگوی آسیب دوم ۴/۷٪ است. هم‌چنین برای نوفه N2، بیشینه میزان خطای نسبی در الگوی آسیب اول و دوم به‌ترتیب برابر با ۸/۵٪ و ۵/۸٪ است. لازم به‌گفتن است که برای تعیین پارامترهای الگوریتم بهینه‌یابی (جمعیت اولیه و تعداد تکرار) در ابتدا یک الگوی آسیب بدون وجود نوفه در نظر گرفته می‌شود. سپس با انجام آزمون و خطا، پارامترهای الگوریتم به شکلی تنظیم می‌شود که محل و شدت آسیب در اعضا با دقت بالا (مقدار تابع هدف مساوی صفر) شناسایی شود. با توجه به منحنی‌های همگرایی ترسیم شده برای قاب برشی شکل (۵) و تیر شکل (۹) ملاحظه می‌شود که مقدار تابع هدف در حالت بدون نوفه به صفر رسیده است، که این امر بیانگر مناسب بودن پارامترهای الگوریتم پروانه-شعله است. به منظور پژوهش و بررسی بیشتر اثر افزایش تعداد جمعیت اولیه بر روی روند شناسایی آسیب، برای الگوی آسیب دوم سازه‌ی خرابی، یک بار شناسایی آسیب با جمعیت اولیه‌ی ۴۰۰، و یک بار هم با جمعیت اولیه‌ی ۶۰۰ انجام می‌شود. نتیجه‌ی این بررسی در شکل (۱۳) نشان داده شده‌است. در هر سه حالت مقدار تابع هدف به عددی بسیار نزدیک به صفر مطلق همگرا شده است. بنابراین همانطور که ذکر شد تعداد جمعیت اولیه برابر با ۲۰۰ برای شناسایی آسیب کافی است. ولی با توجه به شکل چنین نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش تعداد جمعیت اولیه در شماره‌ی تکرار پایین‌تر هم می‌توان به مقدار تابع هدف کمتری دست یافت. به عنوان مثال در شکل (۱۳) در تکرار ۳۰۰ با جمعیت اولیه ۶۰۰ مقدار تابع هدف به عددی از مرتبه‌ی 10^{-6} رسیده است، درحالی‌که در همان تکرار، با جمعیت اولیه‌ی ۲۰۰، مقدار تابع هدف عددی از مرتبه‌ی 10^{-4} شده است.

شکل ۱۰. مدل اجزای محدود خرابی دوبعدی.

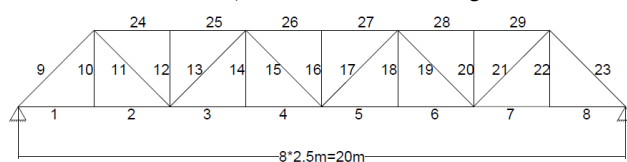


Fig. 10. Finite element model of the two-dimensional truss.

جدول شماره (۶) دو الگوی آسیب دوگانه و سه‌گانه را نشان می‌دهد. مشابه با نمونه‌های قبل، فرض می‌شود که تنها سه مود اول ارتعاش برای شناسایی آسیب در دسترس است. هم‌چنین به‌منظور بررسی آثار نوفه در اندازه‌گیری‌ها، به N1 و N2 مطابق جدول (۳) اضافه می‌شود و توانایی الگوریتم برای شناسایی آسیب در این سازه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۶. الگوهای آسیب خرابی.

Case1		Case2	
Element	Damage	Element	Damage
5	20%	3	30%
25	25%	9	10%
		25	25%

Table. 6. Damage patterns in truss.

در جدول (۷) نتایج بررسی تطابق ترتیب مودها بین سازه‌های آسیب‌دیده و سالم نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که مودهای سازه قبل و بعد از آسیب برهم منطبق بوده و ترتیب آن‌ها برهم نمی‌خورد.

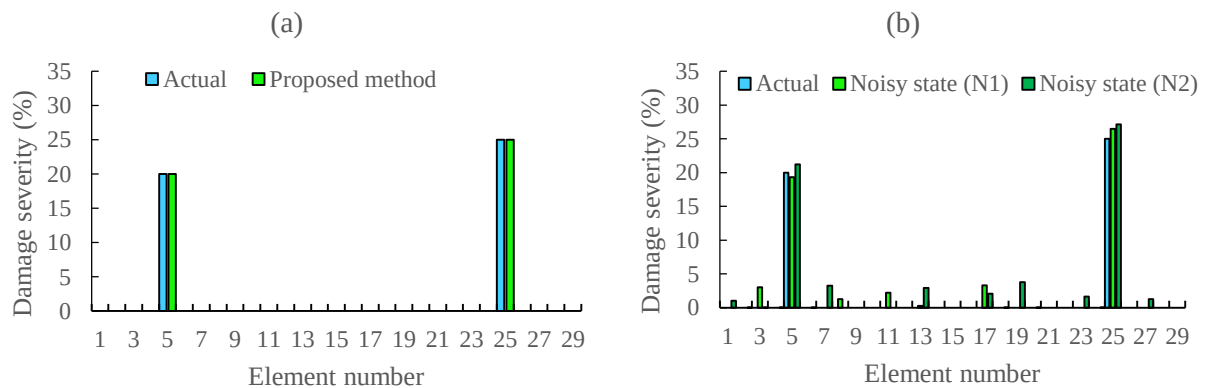
جدول ۷. معیار اطمینان مودال برای کنترل ترتیب مودهای استخراج شده در خرابی.

Case 1			Case 2		
Mode1	Mode2	Mode3	Mode1	Mode2	Mode3
MAC	0.9999	0.9994	0.9979	0.9996	0.9994
				0.9901	

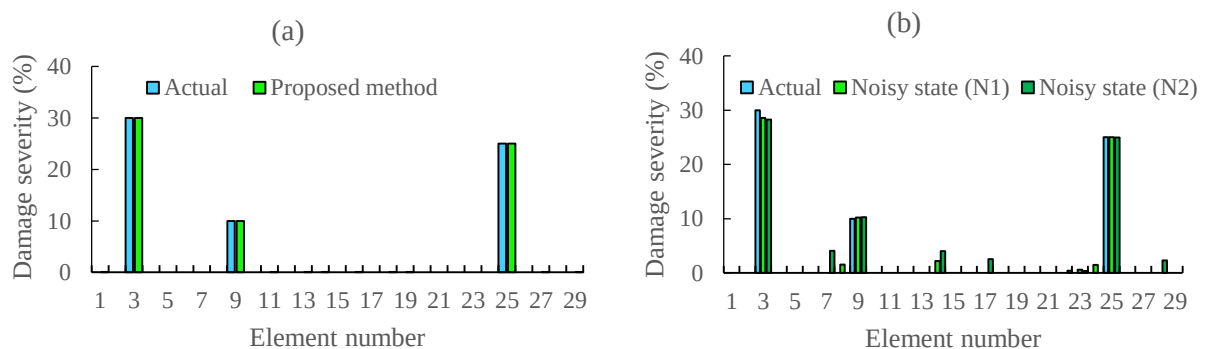
Table. 7. MAC values to control the sequence of the extracted modes in truss.

نتایج بدست‌آمده برای شناسایی آسیب در حالت بدون وجود نوفه در شکل‌های (۱۱-الف و ۱۲-الف)، و در حالت بانوفه در شکل‌های (۱۱-ب و ۱۲-ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای هر دو الگوی آسیب حتی زمانی که آسیب در اعضای قطری خرابی رخ می‌دهد (عضو ۹ در الگوی

شکل ۱۱. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۱ برای خرابی الف- بدون نوفه ب- با نوفه.

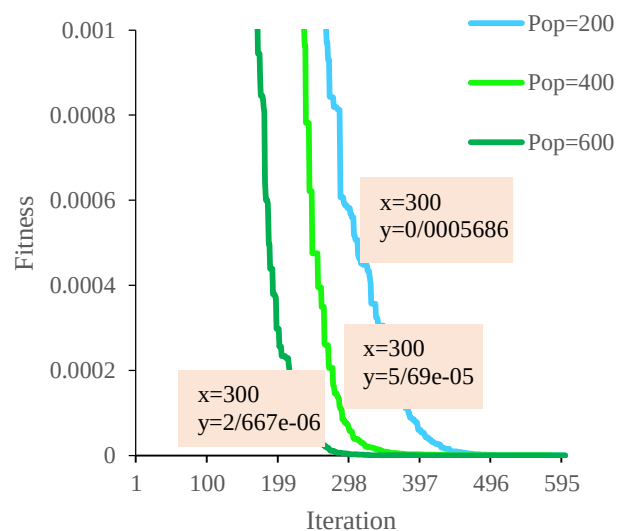
**Fig. 11.** Damage identification results for damage case 1 in truss (a) without noise (b) with noise.

شکل ۱۲. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۲ برای خرابی الف- بدون نوفه ب- با نوفه.

**Fig. 12.** Damage identification results for damage case 2 for truss (a) without noise (b) with noise.

همان‌گونه که ذکر شد برای شناسایی آسیب در سازه‌های پیچیده کمینه داده‌های سه مود ارتعاشی نیاز است و کاهش تعداد مدهای ارتعاشی از دقت شناسایی آسیب می‌کاهد. در ادامه، برای بررسی این موضوع، برای الگوی آسیب اول در خرابی دو بعدی، شناسایی آسیب یک‌بار با در نظر گرفتن دو مود اول ارتعاش و بار دیگر تنها با استفاده از مود اول انجام می‌شود. نتایج شناسایی آسیب با یک مود، دو مود، و سه مود در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ملاحظه می‌شود که با استفاده از یک مود یا دو مود دقت شناسایی آسیب کاهش می‌یابد، حتی تعدادی المان سالم نیز به اشتباه آسیب‌دیده تشخیص داده می‌شوند که این مسئله هنگام استفاده از یک مود بیش‌تر دیده می‌شود. درحالی‌که با استفاده از سه مود، شناسایی آسیب با دقت بالا انجام شده است. هم‌چنین در شکل (۱۴) ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد مدهای ارتعاشی میزان خطا کاهش یافته و شناسایی آسیب

شکل ۱۳. اثر افزایش جمعیت اولیه روی شناسایی آسیب در الگوی آسیب دوم خرابی.

**Fig. 13.** The effects of increasing the initial population on damage identification results in the second damage case of the truss.

(بسامدهای طبیعی و شکل های مود) انجام می شود. تابع هدف اول توسط سادا و همکاران [10] معرفی شده است و مبتنی بر بسامدهای طبیعی است:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\omega_i^{FE}(f_1, f_2, \dots, f_n) - \omega_i^{EXP}}{\omega_i^{EXP}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

در رابطه (6)، ω_i^{FE} و ω_i^{EXP} به ترتیب بسامد طبیعی i ام مدل تحلیلی و اندازه گیری شده، می باشند.

تابع هدف دوم، به صورت استفاده ی هم زمان از بسامدهای طبیعی و شکل های مودی است و رابطه ی آن به صورت زیر می باشد [18]:

$$E = E_{\phi} + E_{\omega}$$

$$E_{\phi} = \sum_{j=1}^r \left\| \frac{\phi_j^m - \phi_j^a}{\phi_j^m + \phi_j^a} \right\| \quad E_{\omega} = \sum_{j=1}^r \left\| \frac{(\omega_j^m - \omega_j^a)^2}{(\omega_j^m)^2} \right\| \quad (7)$$

در رابطه ی (7)، m و a به ترتیب بیانگر سازه ی آزمایش شده (آسیب دیده) و مدل تحلیلی می باشد.

نتایج شناسایی آسیب برای الگوی آسیب اول خرپا توسط دو تابع هدف ذکر شده، در شکل های (الف-۱۶ و ب-۱۶) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، در شرایط برابر (تعداد مود و پارامترهای الگوریتم بهینه یابی یکسان) هیچ یک از این دو تابع هدف نمی تواند محل و شدت آسیب را به درستی تعیین کند. هم چنین، با توجه به شکل ها مشخص است که تابع هدف دوم که به طور هم زمان از بسامدهای طبیعی و شکل های مودی استفاده می کند، نتایج دقیق تری نسبت به تابع هدف اول به دست می دهد.

شکل ۱۵. منحنی های همگرایی خرپا الف- الگوی آسیب ۱ ب- الگوی آسیب ۲.

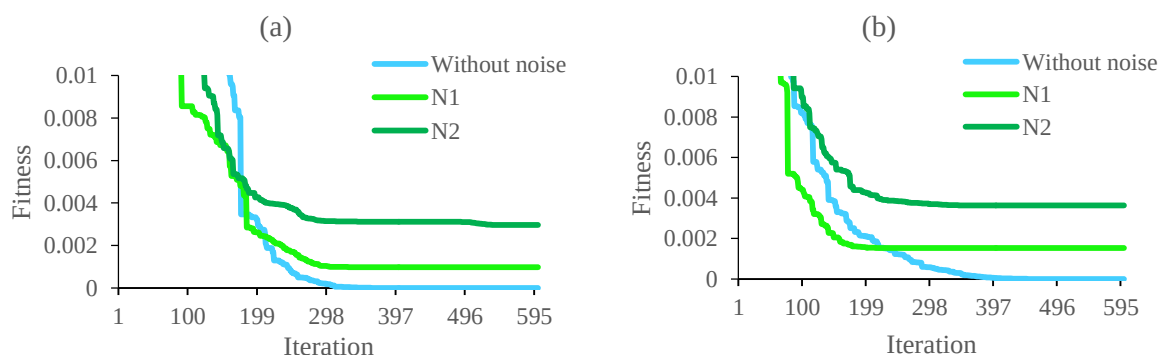


Fig. 15. Convergence curves for the truss in (a) damage case1 (b) damage case2.

دقیق تر انجام می شود. میزان خطای نسبی با استفاده از یک مود ۴/۴٪ برای دو مود ۷/۷٪، و برای سه مود صفر است.

شکل ۱۴. اثر تعداد مودهای ارتعاشی روی شناسایی آسیب در سازه خرپا.

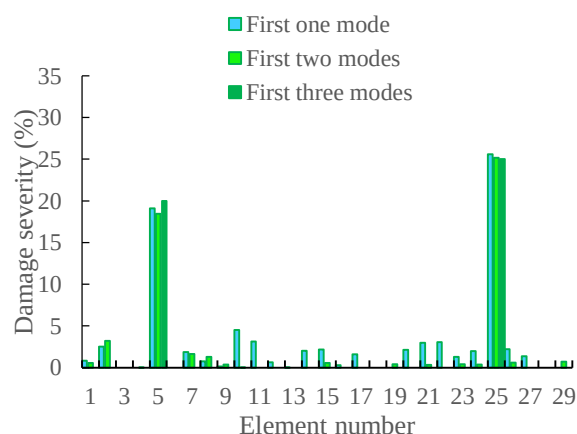


Fig. 14. The effects of the number of vibration modes on damage identification in the truss.

بنابراین به منظور شناسایی دقیق آسیب بایستی حداقل از سه مود اول ارتعاش استفاده شود.

در ادامه با بررسی منحنی های همگرایی در شکل های (الف-۱۵ و ب-۱۵)، دوباره مشاهده می شود که در حالت بدون نوفه الگوریتم بهینه یابی به عددی بسیار نزدیک به صفر همگرا شده است. هم چنین مشاهده می شود که همگرایی برای الگوی آسیب ۲ نسبت به الگوی آسیب ۱ دیرتر رخ می دهد، که این امر با توجه به پیچیده بودن سازه ی خرپایی مورد نظر و بیشتر بودن تعداد اعضای آسیب دیده در الگوی آسیب ۲ نسبت به الگوی آسیب ۱ منطقی است.

در انتهای این بخش، مطالعه ای مقایسه ای بین تابع هدف پیشنهادی و دو تابع هدف دیگر مبتنی بر اطلاعات مودال

شکل ۱۶. نتایج شناسایی آسیب مربوط به الگوی آسیب ۱ برای خرابی با کمک الف- تابع هدف ارائه شده در رابطه ی (۶) ب- تابع هدف تابع هدف ارائه شده در رابطه ی (۷).

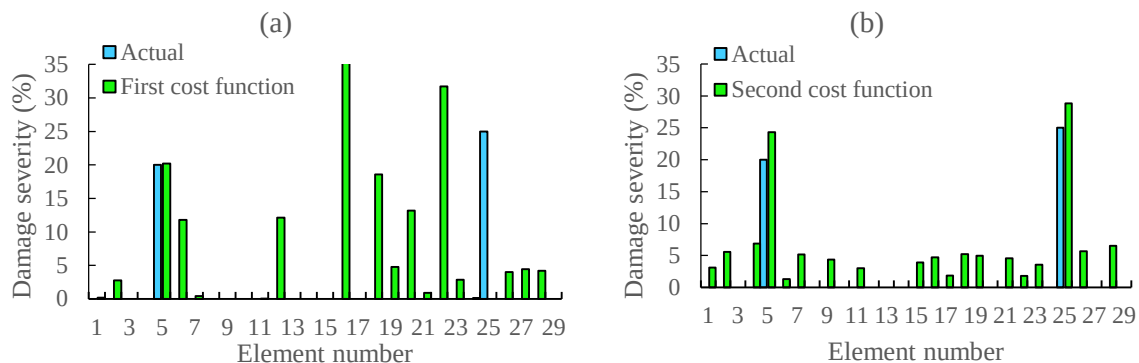


Fig. 16. Damage identification results for damage case 1 of truss using (a) the presented cost function by Eq. (6) (b) the presented cost function by Eq. (7).

References

۶- منابع

- [1] Yan, Y. Cheng, L. Wu, ZY. and Yam, LH. 2007. Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical systems and signal processing*, **21**(5), 2198-2211.
- [2] Friswell, MI. Penny, JET. and Garvey, SD. 1998. A Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures. *Computers & Structures*, **69** (5), 547-556.
- [3] Chou, Jung-Huai. and Ghaboussi, Jamshid. 2001. Genetic Algorithm in Structural Damage Detection. *Computers & structures*, **79**(14), 1335-1353.
- [4] Jaishi, Bijaya. and Ren, Wei-Xin. 2006. Damage Detection by Finite Element Model Updating Using Modal Flexibility Residual. *Journal of sound and vibration*, **290**(1-2), 369-387.
- [5] Raich, Anne M. and Liszkai, Tamás R. 2007. Improving the Performance of Structural Damage Detection Methods Using Advanced Genetic Algorithms. *Journal of structural Engineering*, **133**(3), 449-461.
- [6] Sandesh, S. and Shankar, K. 2010. Application of a Hybrid of Particle Swarm and Genetic Algorithm for Structural Damage Detection. *Inverse Problems in Science and Engineering; Formerly Inverse Problems in Engineering*, **18**(7), 997-1021.
- [7] Srinivas, V. Ramanjaneyulu, K. and Jeyasehar, C Antony. 2011. Multi-Stage Approach for Structural Damage Identification Using Modal Strain Energy and Evolutionary Optimization Techniques. *Structural Health Monitoring*, **10**(2), 219-230.
- [8] Ghodrati Amiri, G. Seyed Razzaghi, SA. and Bagheri, A. 2011. Damage Detection in Plates Based on Pattern Search and Genetic Algorithms. *Smart Structures and Systems*, **7**(2), 117-132.
- [9] Bagheri, A. Razeghi, HR. and Ghodrati Amiri, G. 2012. Detection and Estimation of Damage in

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش مبتنی بر پروزرسانی مدل برای شناسایی آسیب سازه‌ای با به کارگیری مستقیم و بدون واسطه اطلاعات مودال، یعنی بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود معرفی شد، که قادر است تنها با چند مود اول ارتعاش محل و شدت آسیب را تشخیص دهد. تابع هدف پیشنهادی در این روش بر پایه‌ی تابع خطای مستقیم و مفهوم هماهنگی نقطه‌ای رابطه‌بندی، و توسط الگوریتم بهینه‌یابی پروانه-شعله حل شد. کارایی روش ارائه شده با مطالعه و بررسی الگوهای آسیب مختلف روی سه نمونه عددی ارزیابی شد. همچنین مطالعاتی روی کارایی و دقت روش پیشنهادی برای شناسایی آسیب سازه‌ای هنگام استفاده از داده‌های ورودی آلوده به نوفه، انجام شد. هم‌گرایی سریع به صفر مطلق در حالت بدون نوفه و کمترین مقدار تابع هدف در حالت‌های وجود نوفه، مطلوبیت الگوریتم بهینه‌یاب پروانه-شعله را به عنوان یک بهینه‌یاب پرسرعت برای جست‌وجوی فضاهای پاسخ پیچیده، نشان می‌دهد. حساسیت زیاد به آسیب و حساسیت کم به حضور نوفه در داده‌های ورودی از جمله مهمترین مشخصه‌های تابع هدف پیشنهادی است که باعث عمل‌کرد مناسب آن در به‌روزرسانی مدل و سلامت‌سنجی سازه می‌شود.

Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, **30**(5), 347-358.

[15] Seyedpoor, SM. and Montazer, M. 2016. A Damage Identification Method for Truss Structures Using a Flexibility-Based Damage Probability Index and Differential Evolution Algorithm. *Inverse Problems in Science and Engineering*, **24**(8), 1303-1322.

[16] Fan, Wei. and Qiao, Pizhong. 2011. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural health monitoring*, **10**(1), 83-111.

[17] Zare Hosseinzadeh, Ali. Ghodrati Amiri, Gholamreza. and Koo, Ki-Young. 2016. Optimization-Based Method for Structural Damage Localization and Quantification by Means of Static Displacements Computed by Flexibility Matrix. *Engineering Optimization*, **48**(4), 543-561.

[18] Mehrian, Sh Zamani. Amrei, SA Razavian . Maniat, M. and Nowruzpour, SM. 2016. Structural Health Monitoring Using Optimising Algorithms Based on Flexibility Matrix Approach and Combination of Natural Frequencies and Mode Shapes. *International Journal of Structural Engineering*, **7**(4), 398-411.

[19] Mirjalili, Seyedali. 2015. Moth-Flame Optimization Algorithm: A Novel Nature-Inspired Heuristic Paradigm. *Knowledge-Based Systems*, **89**, 228-249.

Structures Using Imperialist Competitive Algorithm. *Shock and Vibration*, **19**(3), 405-419.

[10] Saada, Mohamed M. Arafa, Mustafa H. and Nassef, Ashraf O. 2013. Finite Element Model Updating Approach to Damage Identification in Beams Using Particle Swarm Optimization. *Engineering optimization*, **45**(6), 677-696.

[11] Zare Hosseinzadeh, A. Bagheri, A. and Ghodrati Amiri, G. 2013. Two-Stage Method for Damage Localization and Quantification in High-Rise Shear Frames Based on the First Mode Shape Slope. *International journal of optimization in engineering*, **3** (4), 653-672.

[12] Shirazi, MR Nouri. Mollamahmoudi, H. and Seyedpoor, SM. 2014. Structural Damage Identification Using an Adaptive Multi-Stage Optimization Method Based on a Modified Particle Swarm Algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, **160**(3), 1009-1019.

[13] Kaveh, A. and Zolghadr, A. 2015. An Improved Csa for Damage Detection of Truss Structures Using Changes in Natural Frequencies and Mode Shapes. *Advances in Engineering Software*, **80**, 93-100.

[14] Cha, Young-Jin. And Buyukozturk, Oral. 2015. Structural Damage Detection Using Modal Strain Energy and Hybrid Multiobjective Optimization.

Vibration-based updating method for structural health monitoring using Moth-Flame optimization algorithm

S. A. Seyed Razzaghi^{1*}, B. Adel Sandjideh², G. Ghodrati Amiri³, A. Zare Hosseinzadeh⁴

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

3- Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

4- M.Sc., School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

arazzaghi@pnu.ac.ir

Abstract:

Structural damage not only changes the dynamic characteristics of the structure, but also it may lead to complete destruction of the structure in some cases. Since early identification of damage can prevent such catastrophic events, structural health monitoring and damage detection has absorbed the attention of the civil, mechanical and aerospace engineers in the last decades. An effective health monitoring methodology not only can provide information about the global serviceability of the monitored structure, but also it can help the engineers to prepare cost-effective rehabilitation programs based on the obtained details about the health of the structure and its members. Different methods have been proposed for structural damage identification and estimation. Vibration-based methods consider the changes in the structural modal parameters, like natural frequencies and associated mode shapes, and/or their derivatives, like modal flexibility and residual force vector, for damage identification and quantification. Considering their acceptable sensitivity to wide-range of structural damages, vibration-based methods are considered as one of the most practical approaches for structural fault prognosis. Employing vibration parameters to define the damage detection problem as a model updating problem, is one of the well-known strategies that can return both the damage location and extent in different types of engineering structures. Such methods can be solved with optimization algorithms to find and report the structural damage in terms of the global extremums of a damage-sensitive objective function.

In this paper a new model updating approach for health monitoring and damage localization and quantification in engineering structures is presented. At first, a damage-sensitive objective function, which is based on the error function between the modal data of the monitored structure and its analytical model, is proposed. This objective function is formulated by means of the point-by-point matching strategy to minimize the difference between two models. Modal natural frequencies and the associated mode shape vectors are directly fed to the objective function and this can result in an easy assessment methodology to check the convergence rate of the function. Moreover, in such a case, the objective function uses the sensitivity of both these parameters for damage identification. The proposed inverse problem is solved using Moth-Flame Optimization (MFO) algorithm which has been inspired from spiral convergence of moths toward artificial lights. From mathematical point of view, updating the position of the moths with respect to the flames –which are the best solutions obtained during iterations–, reduces the probability of being trapped in the local extremum points and also, ensures the convergence of the algorithm to its global optimal solution. The applicability of the method was evaluated by studying different damage patterns on three numerical examples of engineering structures: a seven-story shear frame, a simple beam with 10 elements, and a planar truss with 29 elements. In all these studies, damages were simulated as reduction in the stiffness matrix of the damaged elements. Different issues, like noise effects, were considered and their impacts on the performance of the proposed method were investigated. Furthermore, comparative studies were carried out to discuss the advantages and drawbacks of the introduced method as well as the employed techniques. The obtained results indicate that the method is an effective strategy for vibration-based damage detection and localization in engineering structures.

Keywords: Damage identification, Modal data, Objective function, Point-by-point matching strategy, Moth-flame optimization.