



University Of Qom



Damage Identification in Moment Frames Using Mode Shape Parameters and IMRFO Algorithm

Soheil Sabzevari¹ , Hosein Naderpour^{2✉} , Majid Gholhaki³

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: sabzevari.sohail@semnan.ac.ir
2. Corresponding author, Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: naderpour@semnan.ac.ir
3. Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: mgholhaki@semnan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 10 Jun 2025
Revised 28 Aug 2025
Accepted 04 Sep 2025
Published 04 Sep 2025

Keywords:
Structural Health
Monitoring,
Objective Function,
Mode Shape Parameter,
Optimization Algorithm,
Model Updating.

ABSTRACT

This study presents a novel finite element model updating approach for accurate damage identification in moment-resisting frames. The proposed objective function, which integrates mode shape parameters with natural frequencies, demonstrates high sensitivity in detecting both the location and severity of structural damage. To solve the associated optimization problem, an Improved Manta Ray Foraging Optimization (IMRFO) algorithm is employed, enhanced with a Tent chaotic map, bidirectional search strategy, and Lévy flight to address the limitations of the standard MRFO, such as low convergence accuracy and susceptibility to local optima. The Tent map ensures a uniform distribution of initial solutions, the bidirectional search broadens the exploration space, and Lévy flight enables escape from local optima. IMRFO achieves high accuracy and robustness in optimizing the objective function across multiple damage scenarios and noise levels, with an average error below 2% over 20 independent runs, outperforming other algorithms. This framework, combining the mode shape-based objective function with IMRFO, offers a precise, robust, and computationally efficient solution for structural health monitoring.

Cite this article: Sabzevari S, Naderpour H, Gholhaki M. Damage Identification in Moment Frames Using Mode Shape Parameters and IMRFO Algorithm. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 97-116. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13741.1648>



Introduction

All man-made structures have a finite lifespan and are susceptible to various types of damage throughout their service life. Therefore, regular inspections and structural health monitoring (SHM) systems are essential for identifying damaged areas and preventing catastrophic failures. Monitoring changes in a structure's dynamic parameters is a widely adopted approach for damage detection. This study proposes a model updating method that employs an objective function based on the structure's modal parameters, combined with optimization algorithms, to accurately detect damage in moment-resisting frames.

Methodology

In this study, after analyzing the influence of the structure's modal parameters on the objective function, a composite objective function was developed, integrating natural frequencies, mode shapes, and strain energy. The moment-resisting frame was modeled in MATLAB, and a model updating approach was implemented using the IMRFO, MRFO, and WOA optimization algorithms. Under various damage scenarios and noise levels, the proposed objective function effectively minimized the discrepancy between the dynamic parameters of the damaged structure and the model. Consequently, both the location and severity of the damage were accurately identified.

Results

20-element moment-resisting frame was evaluated under multiple damage scenarios and varying noise levels. The results demonstrated that incorporating strain energy into the objective function significantly improved the accuracy of damage localization, without erroneously identifying undamaged elements as damaged. Furthermore, the IMRFO algorithm outperformed the other algorithms, maintaining high accuracy even under high-noise conditions, and successfully identifying both the location and severity of the damage.

Conclusion

By defining the objective function based on the structure's modal parameters and employing a model updating approach combined with an efficient optimization algorithm, reliable results are achieved for structural damage identification, even under noisy conditions.

Funding Statement

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

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Soheil Sabzevari:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Software; Validation; Visualization; Writing – original draft; Writing – review & editing.

Hosein Naderpour:

Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Supervision; Validation; Writing – review & editing.

Majid Gholhaki:

Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Supervision; Validation; Writing – review & editing.

شناسایی آسیب در سازه های قاب خمشی با استفاده از پارامتر شکل مودی و الگوریتم فراابتکاری IMRFO

سهیل سبزواری^۱، حسین نادرپور^۲، مجید قلهکی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: sabzevari.soheil@semnan.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: naderpour@semnan.ac.ir

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: mgholhaki@semnan.ac.ir

چکیده

این پژوهش روشی نوین مبتنی بر به روزرسانی مدل اجزا محدود برای شناسایی دقیق آسیب در قاب های خمشی ارائه می دهد. تابع هدف پیشنهادی با تأکید بر پارامتر شکل مودی و ترکیب آن با فرکانس های طبیعی، حساسیت بالایی برای شناسایی دقیق شدت و محل آسیب ایجاد می کند. برای حل مسئله معکوس، بهینه سازی این تابع هدف با استفاده از الگوریتم بهبود یافته جستجوی غذای سفره ماهی (IMRFO) انجام می گیرد که با استفاده از نگاشت آشوبناک Tent، استراتژی جستجوی دوطرفه و پرواز لوی، کاستی های MRFO استاندارد مانند دقت پایین همگرایی و گیر افتادن در بهینه های محلی را برطرف می کند. نگاشت Tent توزیع یکنواخت راه حل های اولیه را بهبود می بخشد، جستجوی دوطرفه باعث گسترش دامنه و پرواز لوی خروج از بهینه های محلی را تقویت می کند. IMRFO در سناریوهای متفاوت آسیب و تحت نویزهای مختلف با خطای کمتر از ۲٪ در میانگین ۲۰ اجرای مستقل، دقت و مقاومت بالایی در بهینه سازی تابع هدف را در مقایسه با الگوریتم های دیگر نشان داد. این چارچوب با تابع هدف نوآورانه مبتنی بر پارامتر شکل مودی و IMRFO، راهکاری دقیق، مقاوم و محاسباتی بهینه برای پایش سلامت سازه های فراهم می کند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

کلیدواژه ها:

پایش سلامت سازه،

تابع هدف نوین،

پارامتر شکل مودی،

الگوریتم بهینه سازی IMRFO،

به روزرسانی مدل.

استناد: سبزواری سهیل، نادرپور حسین، قلهکی مجید. شناسایی آسیب در سازه های قاب خمشی با استفاده از پارامتر شکل مودی و الگوریتم فراابتکاری IMRFO. پژوهش های زیرساخت های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۹۷-۱۱۶.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.13741.1648>

۱- مقدمه

سازه‌های ساخته‌شده توسط انسان عمر محدودی دارند و از زمان بهره‌برداری در معرض آسیب‌هایی ناشی از خصوصیت رفتاری سازه و عوامل محیطی قرار می‌گیرند که عملکرد آن‌ها را مختل می‌کند. برای جلوگیری از خرابی‌های جدی، بازرسی منظم برای شناسایی نقاط آسیب‌دیده ضروری است. سیستم‌های پایش سلامت سازه (SHM) در دو دهه اخیر توسعه یافته و نظارت مستمر را با حسگرها، پردازش داده، اندازه‌گیری از راه دور و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری ممکن ساخته و نیاز به زمان و نیروی انسانی را کاهش داده‌اند [۱]. روش‌های سنتی غیرمخرب برای پایش برخط مناسب نیستند، اما تکنیک‌های ارتعاشی با حساسیت بالا، پوشش گسترده و سهولت کاربرد، گزینه‌ای کارآمد برای SHM هستند و از ارتعاشات عملیاتی مانند عبور وسایل نقلیه برای استخراج فرکانس‌های طبیعی بهره می‌برند [۲].

آسیب‌های سازه‌ای با تغییر سختی محلی و ویژگی‌های انرژی، بر فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و پارامترهای میرایی اثر می‌گذارند و پایش این تغییرات، تشخیص و ارزیابی آسیب را فراهم می‌کند.

همواره جمع‌آوری داده آسان است، اما چالش پایش رو پردازش حجم عظیم داده‌ها برای استخراج شاخص‌های مفید است. روش‌های شناسایی آسیب به کلی (تشخیص وجود) و محلی (تعیین مکان) تقسیم می‌شوند و به مبتنی بر مدل (با مدل‌های ریاضی دقیق) و غیرمبتنی بر مدل (پردازش سیگنال) طبقه‌بندی می‌گردند [۳].

پایش سلامت در چهار سطح: تشخیص وجود، مکان، شدت و تخمین عمر باقی‌مانده تعریف می‌شود؛ روش‌های ارتعاشی سطوح اول و دوم را پوشش می‌دهند و با مدل سازه‌ای، سطح سوم قابل دستیابی است [۴].

روش‌های مبتنی بر مدل و داده برای چهار سطح کاربرد دارند و اجرای سطوح بالاتر به نتایج قبلی وابسته است. روش‌های مبتنی بر داده به حجم داده‌های طولانی

نیاز دارند و با پیشرفت حسگرها به بزرگ‌داده رسیده‌اند [۵]. تشخیص الگو با انتخاب و طبقه‌بندی ویژگی‌ها، در سازه‌های مکانیکی قوی کارآمد است اما به تخصص نیاز دارد و در داده‌های حجیم مستعد خطا است [۴].

روش‌های ارتعاشی از تغییرات پارامترهای مودال اولیه (فرکانس، شکل مودی، میرایی) یا ثانویه برای تشخیص آسیب استفاده می‌کنند؛ کاهش سختی ناشی از آسیب، تغییرات قابل شناسایی ایجاد می‌کند [۶]. روش‌های مبتنی بر فرکانس، ساده و دقیق هستند اما برای آسیب‌های کوچک محلی محدودیت دارند. سلیمانی نژاد و همکاران [۷] با مدل قاب فولادی و تحلیل لرزه‌ای، از کاهش فرکانس و تحلیل موجک برای تعیین زمان و مکان آسیب استفاده کردند. عزالدین و همکاران [۸] روشی بدون مدل برای قاب بتنی با تبدیل فوریه و موجک ارائه دادند. کائو و همکاران [۹] با منحنی RNFC روش دومرحله‌ای بیزی، آسیب‌های منفرد و چندگانه را در تیرها شناسایی کردند. ون یو هی و همکاران [۱۰] با تغییرات فرکانس ناشی از وسیله پارک‌شده، محدودیت‌های فرکانس طبیعی را رفع کردند.

روش‌های مبتنی بر شکل مودی حساس به آسیب محلی هستند؛ معیار MAC همبستگی مودها را می‌سنجد [۱۱] و COMAC بسطی از آن است [۱۲، ۱۳]. این روش‌ها با وجود برآورد شدت آسیب، به نویز حساس‌اند. خان احمدی و همکاران [۱۴] با شاخص DLI بر پایه موجک و در مطالعه دیگر با WEI و NWDI برای تیر و ستون [۱۵]، مکان آسیب در ستون‌ها را شناسایی کردند. میشر و همکاران [۱۶] با الگوریتم شیر-مورچه و MAC، آسیب را در سازه‌های مختلف حتی با نویز شناسایی کردند. وی و همکاران [۱۷] با PSO بهبودیافته و ترکیب MAC و فرکانس، کارایی روش را نشان دادند. حسینی واعظ و فلاح [۱۸] از روش هیبریدی ژنتیک-PSO و اشکال مودی در صفحات، برای شناسایی آسیب استفاده کردند.

آقاجانی و همکاران [۱۹]، با استفاده از تابع هدفی متشکل از ترکیب نیروی باقی‌مانده مودال و فرکانس‌های

استفاده از شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی مودال، شناسایی دقیق آسیب‌ها در اعضا و مفاصل را در مطالعات عددی و آزمایشگاهی یک پل نمونه ۸ متری با پاسخ‌های دینامیکی اندازه‌گیری شده انجام دادند.

نگویین و همکاران [۳۳]، با استفاده از شاخص آسیب مبتنی بر انرژی کرنشی مودال (MSE) و ارائه یک روش میانگین‌گیری برای ترکیب نتایج دو شاخص موجود، شناسایی و ارزیابی شدت آسیب در تیرها را بهبود دادند و نشان دادند که در نظر گرفتن مودهای بالاتر علاوه بر مود اصلی، دقت تشخیص آسیب را به‌ویژه در حضور نویز افزایش می‌دهد.

روش‌های به‌روزرسانی مدل اجزای محدود برای صحت‌سنجی و برآورد آسیب لرزه‌ای حیاتی‌اند و عمر باقی‌مانده را تخمین می‌زنند [۳۴]. عدم قطعیت‌ها با به‌روزرسانی کاهش می‌یابد و چالش‌هایی مانند مینیمم‌های محلی دارند [۳۵،۳۶]. باسولی و همکاران [۳۷] برای برجی آسیب‌دیده تکنیکی ارائه کردند. اوبرتینی و همکاران [۳۸] تغییرات فرکانس در برج تاریخی را بررسی کردند.

الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی مسائل عمران کاربرد گسترده دارند. انتخاب تابع هدف حساس به آسیب، با کمینه کردن اختلاف واقعی و تحلیلی، کارایی را افزایش می‌دهد.

۲- اهمیت پژوهش

یکی از چالش‌های اساسی در حوزه شناسایی آسیب سازه‌ای، دستیابی به تابع هدفی است که بتواند به‌طور کارآمد با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف همگام شود و همچنین امکان بررسی عملکرد الگوریتم‌های نوین در مسائل مهندسی عمران را فراهم آورد. در این پژوهش، روشی نوین برای شناسایی آسیب در سازه‌های قاب خمشی ارائه می‌گردد. برای این منظور، یک تابع هدف ترکیبی بر اساس پارامتر شکل مودی، مربع فرکانس‌های طبیعی و انرژی کرنشی طراحی شد. این تابع هدف نه تنها موجب

طبیعی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌یابی به شناسایی آسیب در سازه‌های خرابایی پرداختند.

روش‌های مبتنی بر انحنای شکل مودی با افزایش انحنا در آسیب، مکان و شدت را شناسایی می‌کنند اما به داده دقیق نیاز دارند. کیامبلا و همکاران [۲۰] با رابطه تحلیلی و فیلتراسیون، آسیب کم‌شدت در تیرها را شناسایی کردند. باقرخانی و بقلانی [۲۱] با اجزای محدود و ژنتیک، کارایی در تیر و قاب نشان دادند. نوین [۲۲] حساسیت انحنا به ترک را تأیید کرد.

روش‌های مبتنی بر ماتریس نرمی با افزایش نرمی، آسیب را شناسایی می‌کنند و تنها به مودهای اولیه نیاز دارند [۲۳]. فخاریان و نادرپور [۲۴] با موجک، انتخاب قله و ماتریس نرمی دقت بالایی در شناسایی آسیب در قاب‌ها را نشان دادند. قنادی [۲۵] با MFO و تابع هدف جدید، کارایی روش را در خرپا و قاب تأیید کردند.

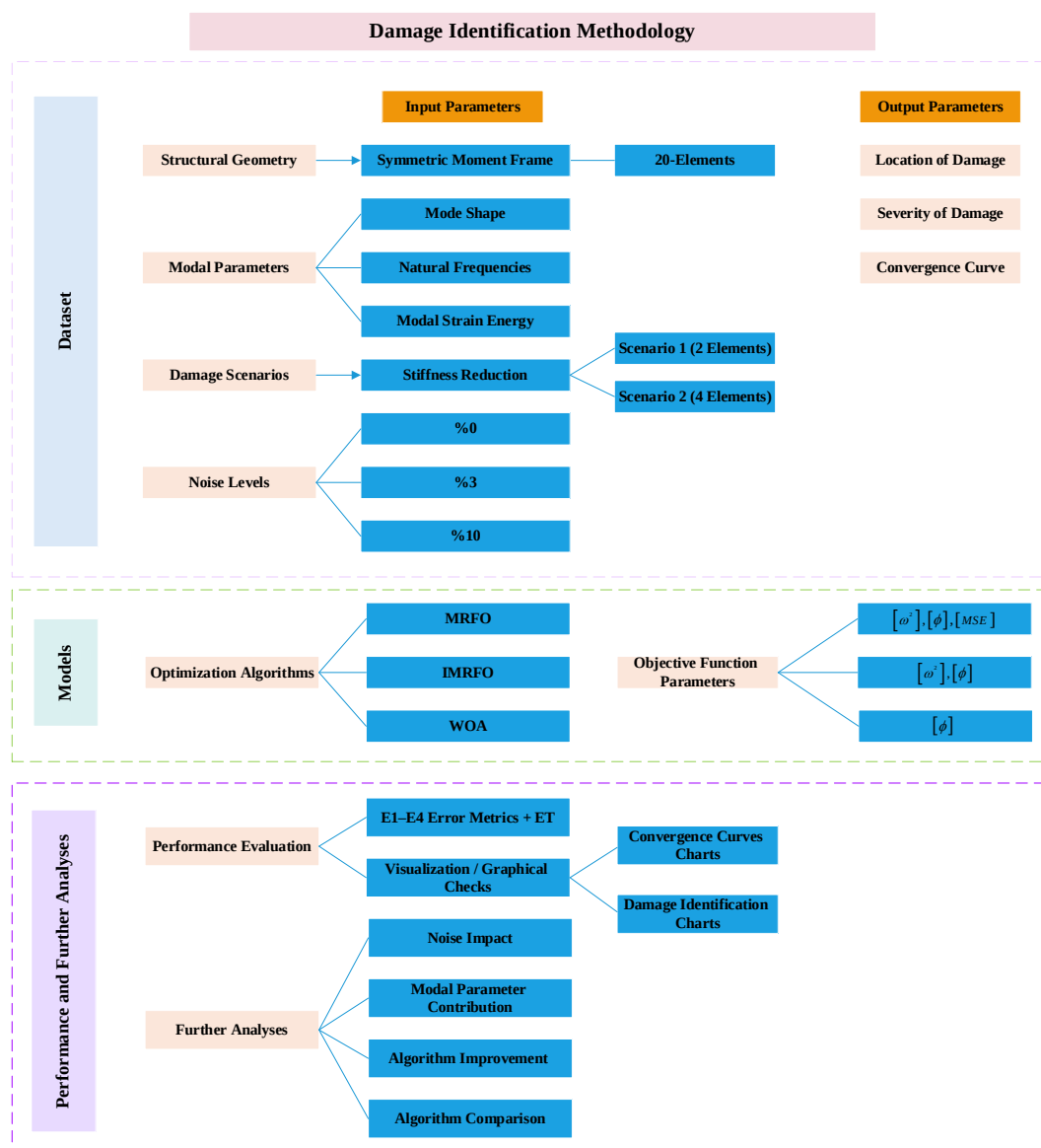
روش‌های مبتنی بر انرژی کرنشی مودال (MSE) مؤثرتر از برخی روش‌های شکل مودی هستند و تغییرات MSE مکان و شدت آسیب را نشان می‌دهد [۲۶]. توسعه‌هایی مانند MSECR حساسیت را افزایش داده‌اند [۲۷]. خطیر و همکاران [۲۸] روش دو مرحله‌ای با شاخص‌های جدید و TLBO برای تیرها ارائه دادند. محمدی ده‌چشمه و همکاران [۲۹] با MFO و تابع هدف ترکیبی و در مطالعه دیگر با WOA دقت بالای این روش را نشان دادند [۳۰].

چن و همکاران [۳۱]، با بهبود الگوریتم ملخ (IGOA) و استفاده از مکانیزم‌های انقباض منطقه‌ای تطبیقی و تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی مودال، شناسایی آسیب در سازه‌ها را با دقت، پایداری و سرعت همگرایی بالاتر نسبت به سایر الگوریتم‌های جمعیتی انجام دادند.

هاو و همکاران [۳۲]، با معرفی یک عنصر اجزای محدود برای اعضای با مقطع غیرهمگن و مفاصل نیمه‌سفت، مدل‌سازی سازه‌های فضایی را بهبود دادند و با

صورت گرفت. در ادامه، با تعریف سناریوهای مختلف آسیب و به‌کارگیری نسخه بهبود یافته الگوریتم‌های بهینه‌سازی، کارایی روش پیشنهادی در شناسایی دقیق و قابل اعتماد آسیب مورد بررسی و تأیید قرار گرفت. مراحل انجام این پژوهش در شکل ۱ آورده شده است.

ارتقای دقت در شناسایی محل و شدت آسیب می‌گردد، بلکه از تشخیص اشتباه المان‌های سالم به‌عنوان المان آسیب‌دیده جلوگیری می‌کند. مدل‌سازی سازه با روش اجزای محدود در نرم‌افزار MATLAB انجام شد و شبیه‌سازی آسیب با کاهش سختی المان‌های سازه‌ای



شکل ۱- فلوچارت روند پژوهش

۳- تئوری شناسایی آسیب

۳-۱- الگوریتم MRFO

کاوش و بهره‌برداری، برای حل مسائل بهینه‌سازی، توسعه یافته‌اند که از سه استراژی کارآمد بهره می‌برند [۳۹].

۳-۱-۱- جستجوی زنجیره‌ای

الگوریتم MRFO با الهام از رفتار سفره‌ماهی‌ها در یافتن منابع غذایی و با مدل‌سازی ریاضی استراتژی‌های

در این الگوریتم سفره‌ماهی‌ها پس از مشاهده موقعیت پلانکتون‌ها، به سمت موقعیت بهتر که محلی است با چگالی بالاتر پلانکتون‌ها، حرکت می‌کنند. با وجود

این استراتژی بهره‌برداری خوبی از ناحیه بهترین راهحل یافت‌شده فراهم می‌کند. برای تقویت کاوش، سفره‌ماهی‌ها می‌توانند به سمت موقعیت تصادفی جدیدی در کل فضای جستجو طبق معادله (۳) هدایت شوند.

$$X_{rand}^d(t) = LL^d + r * (UL^d - LL^d)$$

در فضای جستجو است، UL^d و LL^d حد پایین و بالای بعد d را نشان می‌دهند.

۳-۱-۳- جستجوی چرخشی

در این استراتژی، موقعیت غذا به‌عنوان محور در نظر گرفته می‌شود. هر سفره‌ماهی به‌صورت رفت و برگشتی حول این محور شنا کرده و با حرکات چرخشی به موقعیت جدیدی می‌رسد، به‌طوری‌که همیشه موقعیت خود را نسبت به بهترین موقعیت یافت‌شده (غذای با چگالی بالا) به‌روزرسانی می‌کند. مدل ریاضی این رفتار به‌صورت معادله (۴) است. این مدل امکان حرکت هر سفره‌ماهی را به هر نقطه‌ای بین موقعیت فعلی و موقعیت متقارن آن حول بهترین موقعیت فراهم می‌کند. با کاهش فاصله بین موقعیت فعلی و بهترین موقعیت، اختلال در موقعیت کاهش یافته و سفره‌ماهی‌ها به‌تدریج به راهحل بهینه نزدیک می‌شوند. محدوده جستجوی چرخشی با افزایش تکرارها به صورت تطبیقی کاهش می‌یابد. r_2 و r_3 اعداد تصادفی در محدوده $[0,1]$ هستند، SF عامل چرخش را نشان می‌دهد، ($SF = 2$).

ناشناخته بودن بهترین راهحل، الگوریتم فرض می‌کند که در بهترین جواب یافت‌شده تا کنون است. در استراتژی جستجوی زنجیره‌ای، سفره‌ماهی‌ها به‌صورت سر به دم در یک خط قرار می‌گیرند. به‌جز سفره‌ماهی اول، هریک به سمت غذا و سفره‌ماهی جلویی خود حرکت می‌کند. در هر تکرار، موقعیت هر سفره‌ماهی بر اساس بهترین راهحل یافت‌شده و موقعیت سفره‌ماهی جلویی به‌روزرسانی می‌شود. مدل ریاضی این رفتار به‌صورت معادله (۱) است. در این معادله $X_i^d(t)$ ، موقعیت کنونی، X_{best} ، بهترین موقعیت جهانی کنونی، $r \in [0,1]$ ، عدد تصادفی کنترل‌کننده مقدار حرکت، $a = 2r \sqrt{|\log(r)|}$ و N ، اندازه جمعیت است.

۳-۲-۱- جستجوی گردبادی

در استراتژی جستجوی گردبادی الگوریتم، هنگامی که گروهی از سفره‌ماهی‌ها توده‌ای از پلانکتون را شناسایی می‌کنند، به‌صورت زنجیره‌ای طولانی تشکیل صف داده و با حرکتی مارپیچی به سمت غذا شنا می‌کنند. این رفتار مشابه استراتژی مارپیچی در الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ است، اما در MRFO، هر سفره‌ماهی علاوه بر حرکت به سمت غذا، به سمت سفره‌ماهی جلویی خود نیز حرکت می‌کند که به‌صورت معادله (۲) مدل‌سازی می‌گردد. در این رابطه، β ، ضریب وزنی است

$(\beta = 2e^{r_1 \frac{t_{max}-t+1}{t_{max}}} * \sin(2\pi r_1))$ یک عدد تصادفی در محدوده $[0,1]$ است و t_{max} حداکثر تعداد تکرارها را نشان می‌دهد.

$$X_i^d(t+1) = \begin{cases} X_i^d(t) + r(X_{best}^d(t) - X_i^d(t)) + a(X_{best}^d(t) - X_i^d(t)) & \text{for } i = 1 \\ X_i^d(t) + r(X_{i-1}^d(t) - X_i^d(t)) + a(X_{best}^d(t) - X_i^d(t)) & \text{for } i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

$$X_i^d(t+1) = \begin{cases} X_{best}^d(t) + r(X_{best}^d(t) - X_i^d(t)) + \beta(X_{best}^d(t) - X_i^d(t)) & \text{for } i = 1 \\ X_{best}^d(t) + r(X_{i-1}^d(t) - X_i^d(t)) + \beta(X_{best}^d(t) - X_i^d(t)) & \text{for } i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

$$X_i^d(t+1) = \begin{cases} X_{rand}^d(t) + r(X_{rand}^d(t) - X_i^d(t)) + \beta(X_{rand}^d(t) - X_i^d(t)) & \text{for } i = 1 \\ X_{rand}^d(t) + r(X_{i-1}^d(t) - X_i^d(t)) + \beta(X_{rand}^d(t) - X_i^d(t)) & \text{for } i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

$$X_i^d(t+1) = X_{rand}^d(t) + SF(r_2 X_{best}^d(t) - r_3 X_i^d(t)) \quad \text{for } i = 1, \dots, N \quad (4)$$

۳-۱-۴- ساختار کلی

$$\begin{cases} x_{k+1} = \frac{x_k}{\mu}, & 0 < x_k < \mu \\ x_{k+1} = \frac{(1-x_k)}{(1-\mu)}, & \mu < x_k < 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{i,j} = x_{min,j} + x_{k,j} \times (x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (6)$$

که در آن x_k مقدار فعلی، μ پارامتر کنترل آشوب (معمولاً $\mu = 0.5$) و $x_{max,j}, x_{min,j}$ ، کران‌های پایین و بالای بعد j ام هستند. نگاشت Tent در بازه $(0,1)$ حالت آشوبناک دارد، اما برای $\mu = 0.5$ توزیع دوره‌ای می‌شود. بنابراین $\mu \neq 0.5$ برای تضمین تصادفی بودن و یکنواختی انتخاب می‌گردد. در این پژوهش مراحل اولیه‌سازی جمعیت سفره‌ماهی‌ها با نگاشت Tent به صورت زیر انجام می‌شود. مرحله اول تنظیم جمعیت N سفره‌ماهی، بعد D ، حداکثر تعداد تکرارها k ، تولید تصادفی مقدار اولیه جمعیت $x_{(i,j)}$ و انتخاب $\mu_{(j)} \in rand(0,1)$ و $\mu \neq 0.5$. مقادیر اولیه $i, j, k = 1$ هستند.

در مرحله دوم تکرار براساس معادله (۶) با به‌روزرسانی $j \rightarrow j+1, k \rightarrow k+1$ برای تولید $x_{k,j}$ جمعیت اولیه $x_{i,j}$ با تکرار $i \rightarrow i+1$ طبق معادله (۵) تولید می‌شود.

در مرحله سوم بررسی تعداد تکرارها انجام می‌شود. اگر k به حداکثر برسد، دنباله X خروجی داده می‌شود؛ در غیر این صورت، بازگشت به مرحله دوم و ادامه تکرار صورت می‌پذیرد. این روش با ایجاد توزیع یکنواخت و تصادفی، کیفیت راه‌حل‌های اولیه را بهبود داده و به کاوش بهتر در فضای جستجو کمک می‌کند.

۳-۲-۲- استراتژی جستجوی دوطرفه

استراتژی جستجوی دوطرفه برای گسترش دامنه جستجو و جلوگیری از محدود شدن الگوریتم به یک جهت ثابت به کار گرفته شده است که، به صورت معادلات (۷) و (۸) فرموله می‌شود.

$$\begin{aligned} x_{i+1}^d &= x_i^d + rand \times (x_{best}^d - x_i^d) - \\ &rand \times (x_{worst}^d - x_i^d) \end{aligned} \quad (7)$$

این الگوریتم با ایجاد جمعیتی تصادفی آغاز می‌شود. در هر تکرار، هر سفره‌ماهی موقعیت خود را نسبت به سفره‌ماهی جلویی و موقعیت مرجع (بهترین موقعیت یا موقعیت تصادفی) به‌روزرسانی می‌کند. نسبت t/T که از $1/T$ تا ۱ تغییر می‌کند، تعیین‌کننده تعادل بین کاوش و بهره‌برداری است. اگر $t/T < rand$ ، موقعیت مرجع بهترین موقعیت برای بهره‌برداری است. اگر $t/T > rand$ ، موقعیت تصادفی برای کاوش انتخاب می‌شود.

همچنین بین جستجوی زنجیره‌ای و گردبادی جابه‌جا می‌شود و سپس با جستجوی چرخشی موقعیت‌ها را به‌روزرسانی می‌کند. این فرایند تا رسیدن به معیار توقف ادامه می‌یابد و بهترین موقعیت و مقدار تناسب آن نشان داده می‌شود.

۳-۲-۳- الگوریتم IMRFO

الگوریتم MRFO از سه استراتژی جستجوی زنجیره‌ای، گردبادی و چرخشی سفره‌ماهی‌ها الهام گرفته و با سرعت همگرایی بالا و توانایی جستجوی جهانی قوی، در زمینه‌های بسیاری کاربرد دارد. با این حال، MRFO در فازهای کاوش و بهره‌برداری با مشکلاتی مانند دقت پایین و گیر افتادن در بهینه‌های محلی مواجه است.

برای رفع این کاستی‌ها، الگوریتم بهبودیافته آن با سه استراتژی نگاشت آشوبناک Tent، جستجوی دوطرفه و استراتژی پرواز لوی معرفی شده است [۴۰].

۳-۲-۱- نگاشت آشوبناک Tent

این نگاشت یک مدل ریاضی آشوبناک است که به دلیل تصادفی بودن قوی و یکنواختی بالا، در بهینه‌سازی الگوریتم‌های مختلف به کار می‌رود. این روش با ایجاد توزیع یکنواخت‌تر در مقایسه با روش‌های تصادفی معمولی، کیفیت راه‌حل‌های اولیه را بهبود می‌بخشد و فضای جستجو را گسترش می‌دهد. معادلات ریاضی این نگاشت به صورت معادله (۵) و (۶) است.

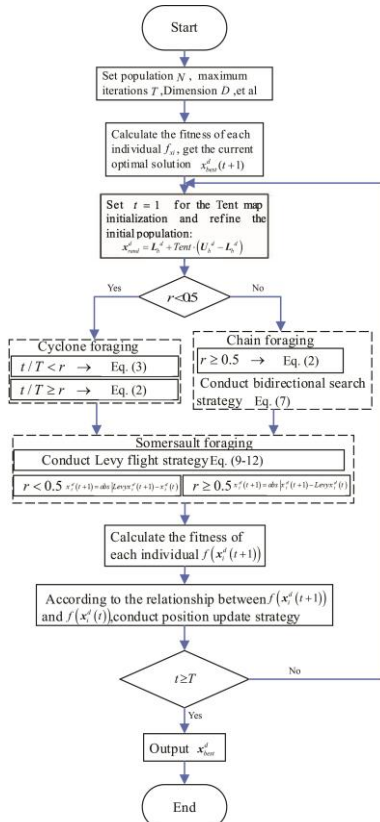
$$s = \frac{\mu}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (11)$$

$$\left\{ \sigma_{\mu} = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta 2^{\frac{(\beta-1)}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \right. \quad (12)$$

$$\left. \sigma_v = 1 \right.$$

در این معادلات x_i^t موقعیت در تکرار t ، پارامتر کنترل گام، $\oplus$ ضرب نقطه به نقطه، $Levy(\lambda)$ مسیر جستجوی تصادفی، s اندازه گام جستجو، $\beta \in (1, 2]$ و معمولاً برابر ۱/۵ لحاظ می‌شود. μ, v توزیع نرمال با $\mu \sim N(0, \sigma_{\mu}^2), v \sim N(0, \sigma_v^2)$ است.

پرواز لوی با ایجاد پرش‌های تصادفی بزرگ، به الگوریتم کمک می‌کند تا از بهینه‌های محلی خارج شده و کاوش گسترده‌تری انجام دهد. شکل ۲ فلوجارت الگوریتم IMRFO را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- فلوجارت روند الگوریتم IMRFO، ترسیم مجدد از

[۴۰]

$$\begin{cases} f(x_{i(t+1)}^d) < f(x_{i(t)}^d), x_{i(t+1)}^d = x_{i(t+1)}^d \\ f(x_{i(t+1)}^d) \geq f(x_{i(t)}^d), x_{i(t+1)}^d = x_{i(t+1)}^d \end{cases} \quad (8)$$

که در این معادلات x_{best}^d و x_{worst}^d بهترین و بدترین راه حل فعلی، $f(x_{i(t)}^d)$ مقدار تناسب در تکرار t ، $f(x_{i(t+1)}^d)$ مقدار تناسب در تکرار $t+1$ و $rand$ در بازه $[0,1]$ است.

در IMRFO، پس از مرحله جستجوی زنجیره‌ای، اگر استراتژی دوطرفه استفاده نشود، جستجو تنها در جهت کاهش مقدار تناسب ادامه می‌یابد، که ممکن است به بهینه محلی منجر شود. اما با اعمال جستجوی دوطرفه، الگوریتم هم‌زمان در دو جهت (به سمت بهترین و بدترین راه‌حل) جستجو می‌کند، از بهینه‌های محلی خارج شده و به سمت راه‌حل بهینه (x_{best}^d) حرکت می‌کند. این استراتژی دامنه جستجو را به‌طور مؤثری گسترش می‌دهد و از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند.

۳-۲-۳- استراتژی پرواز لوی

استراتژی پرواز لوی، که ریشه در نظریه آشوب دارد، در شبیه‌سازی پدیده‌های طبیعی تصادفی و شبه‌تصادفی کاربرد گسترده‌ای دارد. این استراتژی یک فرایند گام‌برداری تصادفی با ترکیبی از گام‌های کوچک و بزرگ است که به‌عنوان یک فرایند غیرگوسی شناخته می‌شود. در مرحله جستجوی چرخشی الگوریتم بهبودیافته جستجوی غذای سفره‌ماهی، پرواز لوی برای به‌روزرسانی جمعیت استفاده می‌شود تا تنوع راه‌حل‌ها، دامنه جستجو و توانایی بهینه‌سازی افزایش یابد. پرواز لوی به‌صورت معادلات (۹) تا (۱۲) فرموله می‌شود.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus Levy(\lambda) \quad (9)$$

$$Levy \sim u = t^{-\lambda}, 1 < \lambda \leq 3 \quad (10)$$

۳-۳- فرمول بندی مساله آسیب

در این پژوهش، مسئله شناسایی آسیب سازه‌ای به‌عنوان یک مسئله معکوس بهینه‌سازی تعریف شده است که با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری مناسب حل می‌شود. برای مدل‌سازی آسیب در سازه می‌توان از روش‌های مختلفی از جمله کاهش مقادیر ماتریس سختی، ماتریس جرم، تغییرات ماتریس میرایی و کاهش مدول الاستیسیته استفاده کرد. در این پژوهش به منظور مدل‌سازی آسیب از کاهش مقادیر ماتریس سختی استفاده می‌شود. از آنجایی که در محدوده مسائل مورد بحث ما خرابی بر روی ماتریس جرم تأثیر قابل توجهی ندارد، تنها تغییرات سختی، نماینده حضور و شدت خرابی خواهد بود. بنابراین شاخص خرابی α_i به نمایندگی از خرابی المان i ام با مقداری بین صفر برای المان کاملاً سالم و یک برای المان کاملاً آسیب‌دیده، نشانگر درصد کاهش سختی المان مذکور است.

$$K_i^a = K_i (1 - \alpha_i) \quad (13)$$

در این رابطه K_i^a نشان دهنده سختی المان i ام از سازه آسیب‌دیده، K_i سختی المان i ام سازه سالم و α_i شدت خرابی المان i ام است.

سختی کل سازه آسیب‌دیده، از سرهم کردن سختی المان‌های آسیب‌دیده به صورت تابعی از شاخص خرابی تک تک المان‌ها با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$K(a_1, \dots, a_n) = \bigcup_{i=1}^n K_i^a \quad (14)$$

در رابطه فوق، $K(a_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ سختی سازه آسیب‌دیده و n تعداد المان‌های مدل اجزاء محدود است.

هدف از تعریف مسئله معکوس شناسایی آسیب در این پژوهش، یافتن شاخص آسیب سازه‌ای است به‌گونه‌ای که اختلاف بین تابع هدف پیشنهادی برای سازه آسیب‌دیده و مدل اجزای محدود آن به حداقل برسد و حداکثر تطابق بین نتایج مدل تحلیلی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده حاصل شود. تابع هدف با استفاده از ترکیب پارامترهای مرتبط با مودشپ و فرکانس‌های طبیعی سازه، فرمول‌بندی شده

است. این تابع هدف برای مقایسه مدل تحلیلی و سازه آسیب‌دیده تحت عملیات بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. در ادامه، اصول لرزه‌ای و فرمول‌های دینامیک سازه که برای استخراج پارامترهای تابع هدف استفاده می‌شوند، معرفی می‌گردد.

۳-۳-۱- استخراج پارامترهای مودال سازه

برای یک سازه با n درجه آزادی با صرف نظر از میرایی سازه معادله ارتعاش آزاد سازه به صورت رابطه (۱۵) خلاصه می‌شود [۲۳].

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (15)$$

در این رابطه $[M]$ ماتریس جرم و $[K]$ ماتریس سختی سازه، $\{u\}$ بردار شتاب، $\{u\}$ بردار جابه‌جایی و $\{P\}$ بردار نیرو است. تمام این بردارها و ماتریس‌ها از مرتبه n هستند و اطلاعات تمام درجات آزادی سازه را شامل می‌شوند.

پارامترهای لرزه‌ای یک سازه نظیر فرکانس طبیعی و شکل مودی با رابطه (۱۶) [۲۳]، قابل استخراج است.

$$[K - \omega_i^2 M]\phi_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

مربع فرکانس‌های طبیعی در یک ماتریس قطری به‌صورت معادله (۱۷) [۲۳]، نمایش داده می‌شوند.

$$[\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \omega_{N_m}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

اشکال مودال $[\phi]$ بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه معادله (۱۶) هستند و در یک ماتریس قطری در معادله (۱۸) [۲۳]، جمع‌آوری می‌شوند.

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1N_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \dots & \phi_{nN_m} \end{bmatrix} \quad (18)$$

انرژی کرنشی مودال، انرژی ذخیره‌شده سازه طی ارتعاش در یک مود خاص است. این معیار به تغییرات سختی حساس و با استفاده از معادله (۱۹) تعریف می‌شود.

$$MAC(X, Y) = \frac{|X^T Y|^2}{(X^T X)(Y^T Y)} \quad (21)$$

X و Y بردارهای دلخواه و T ترانهاده ماتریس است. در این پژوهش، MAC برای اشکال مودال و انرژی کرنشی مودال محاسبه می‌شود. برای اشکال مودال، به‌عنوان $MACMS$ و برای انرژی کرنشی به‌عنوان $MACMSE$ آورده شده است.

همبستگی بین اشکال مودال سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی با استفاده از معادله (۲۲) تعریف شده است [۱۱].

$$MACMS(\phi_i^d, \phi_i^m) = \frac{|\phi_i^{dT} \cdot \phi_i^m|^2}{(\phi_i^{dT} \cdot \phi_i^d)(\phi_i^{mT} \cdot \phi_i^m)} \quad (22)$$

که در آن ϕ_i^d و ϕ_i^m به‌ترتیب بردارهای شکل مودال i ام برای سازه‌های آسیب‌دیده و مدل هستند. همچنین برای دقت بیشتر از ماتریس انرژی کرنشی نیز استفاده شد. بنابراین، معادله (۲۳) MAC را برای هر ستون از این ماتریس، که به‌عنوان $MACMSE$ نامیده می‌شود، نشان می‌دهد.

$$MACMSE(MSE_i^d, MSE_i^m) = \frac{|MSE_i^{dT} \cdot MSE_i^m|^2}{(MSE_i^{dT} \cdot MSE_i^d)(MSE_i^{mT} \cdot MSE_i^m)} \quad (23)$$

$i = 1, \dots, N_m$

همچنین در این معادله MSE_i^d و MSE_i^m ، به‌ترتیب ستون i ام ماتریس انرژی کرنشی برای سازه‌های آسیب‌دیده و مدل هستند.

همچنین برای کاهش خطا و بالا بردن دقت محاسبات از ماتریس قطری مربعات فرکانس طبیعی نیز استفاده گردید و در نهایت معادله تابع هدف برای اندازه‌گیری اختلاف بین ویژگی‌های دینامیکی سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی، به صورت رابطه (۲۴) ارایه گردید. در این معادلات تعداد مود شیب است.

$$U_i^j = \frac{1}{2} \phi_{i,j}^T K_i \phi_{i,j} \quad (19)$$

K_i ماتریس سختی المان i ام سازه و $\phi_{i,j}$ بردار شکل مودال j ام مرتبط با المان i ام است. بنابراین، انرژی کرنشی مودال برای هر المان در هر مود به صورت جداگانه قابل محاسبه است. معادله (۲۰) ماتریس انرژی کرنشی سازه را نشان می‌دهد.

$$[MSE] = \begin{bmatrix} U_1^1 & \dots & U_1^j \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U_i^1 & \dots & U_i^j \end{bmatrix} \quad (20)$$

۳-۳-۲- تابع هدف پیشنهادی

یکی از مراحل کلیدی در شناسایی آسیب سازه‌ای، تعریف تابع هدفی مؤثر، کارآمد و حساس به آسیب است. چنین تابع هدفی عملکرد فرایند بهینه‌سازی را بهبود می‌بخشد، از گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی یا ارائه پاسخ‌های نادرست جلوگیری می‌کند و همگرایی سریع‌تر به پاسخ بهینه کلی را تسهیل می‌نماید. برای ایجاد این تابع هدف، باید پارامترهای حساس به آسیب در سازه شناسایی و با روابط ریاضی، تابعی فرموله شود که اختلاف بین سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی را به حداقل برساند.

یکی از پارامترهایی که با استفاده از تحلیل دینامیکی سازه استخراج گردیده است، اشکال مودال $[\phi]$ هستند. از این رو با استفاده از این پارامتر و همچنین برای حساسیت بیشتر نسبت به یافتن المان آسیب‌دیده از ترکیب این پارامتر با سختی محلی برای بدست آوردن انرژی کرنشی هر المان استفاده شده است.

همبستگی بین پارامترهای مودال سازه آسیب‌دیده و مدل تحلیلی با استفاده از معیار اطمینان مودال (MAC) اندازه‌گیری می‌گردد. معادله (۲۱) توصیف ریاضی آن را نشان می‌دهد.

$$Objective.Function = \left| 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_m} MACMS_i \right) \left(\sum_{i=1}^{N_m} MACMSE_i \right) \left(\sum_{i=1}^{N_m} \frac{\min(\omega_{i,d}^2, \omega_{i,m}^2)}{\max(\omega_{i,d}^2, \omega_{i,m}^2)} \right)}{N_m^3} \right| \quad (24)$$

۳-۳-۳- نحوه اعمال نویز

با وجود دقت بالا و پیچیدگی محاسباتی، روش‌های به‌روزرسانی مدل تنها در مواردی قابل استفاده هستند که داده‌های قابل‌اعتماد از سازه آسیب‌دیده در دسترس باشد. برای ارزیابی پایداری این روش‌ها در برابر خطاهای اندازه‌گیری، پژوهشگران معمولاً میزان کمی نویز تصادفی به داده‌ها اضافه می‌کنند.

برای ارزیابی روش شناسایی آسیب پیشنهاد شده در این پژوهش، اثر نویز بر روی داده‌های فرکانس و شکل مودی اعمال گردید و نتایج شناسایی آسیب در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

در حضور نویز، اثر آن از طریق رابطه ریاضی نشان داده‌شده در معادله (۲۵) در ساختار آسیب‌دیده لحاظ می‌شود.

$$[D_n] = [D] + (\eta \times (rand_1 \text{ or } rand_2)) [D] \quad (25)$$

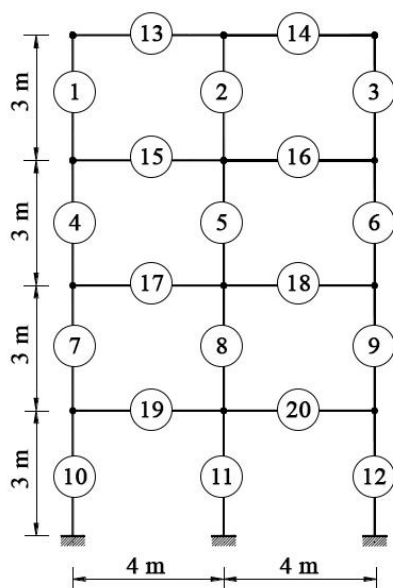
$[D_n]$ داده‌های دارای نویز، $[D]$ داده‌های بدون نویز و η میزان نویز اعمالی و $rand_1, rand_2$ یک عدد تصادفی در بازه $[-1, 1]$ است که برای داده‌های فرکانس و مودشیپ جداگانه اعمال می‌گردد.

۳-۴- مدل سازه تحت بررسی

سیستم سازه‌ای مورد تحلیل، یک مدل قاب متقارن دوبعدی متشکل از ۲۰ المان و ۱۵ گره، که هر گره دارای سه درجه آزادی است (مطابق شکل ۳). ویژگی‌های مصالح در جدول ۱ ذکر شده‌اند و سناریوهای آسیب در جدول ۲ تعریف شده‌اند.

۴- تفسیر نتایج شناسایی آسیب

در شکل ۴ نتایج شناسایی آسیب با اعمال سناریوهای آسیب و سه مود اول سازه با استفاده از الگوریتم IMRFO در برابر ۳ حالت نویزی آورده شده است. در شکل ۵ نمودار همگرایی تابع هدف نشان داده شده است.



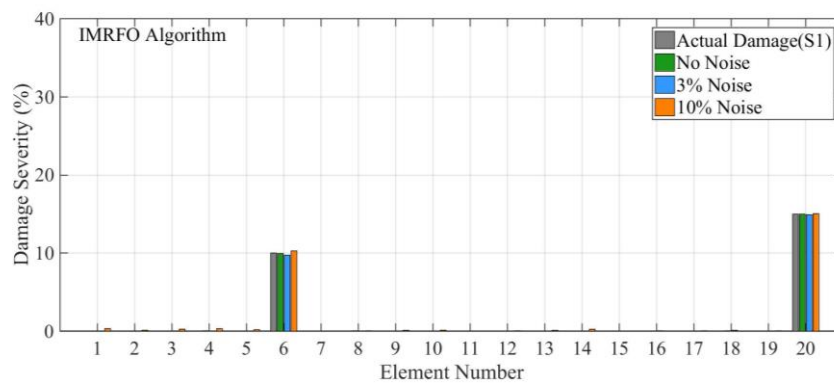
شکل ۳- سازه قاب خمشی ۲۰ عضوی

جدول ۱- مشخصات مقاطع قاب خمشی

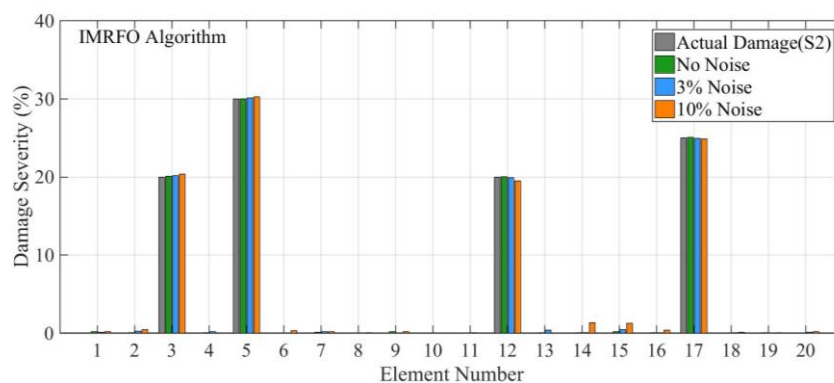
نوع عضو	مساحت (m^2)	ممان اینرسی ($\times 10^{-4} m^4$)	وزن واحد (kg/m)	مدول الاستیسیته (GPa)
تیر (۴۰×۶۰)	۰/۲۴	۱۲۸	۵۸۷/۵۲	۲۸/۲
ستون (۵۰×۵۰)	۰/۲۵	۵۲	۶۱۲	۲۸/۲

جدول ۲- سناریوهای آسیب در قاب خمشی

سناریو	المان آسیب دیده	شدت آسیب (%)
۱	المان ۶	۱۰
	المان ۲۰	۱۵
۲	المان ۳	۲۰
	المان ۵	۳۰
	المان ۱۲	۲۰
	المان ۱۷	۲۵

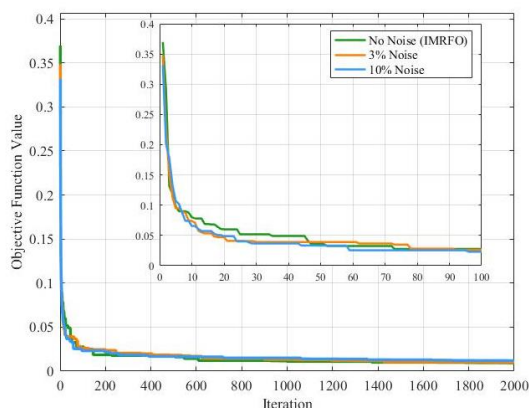


الف) سناریو ۱ آسیب.

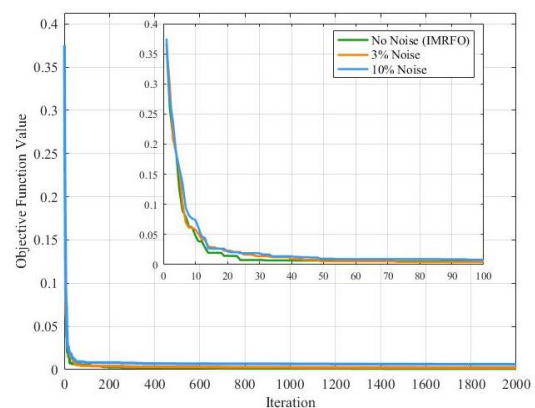


ب) سناریو ۲ آسیب.

شکل ۴- محل و شدت آسیب شناسایی شده برای سناریو آسیب ۱ و ۲ تحت سطوح نویز متغیر (الگوریتم IMRFO)



ب) سناریو ۲ آسیب.



الف) سناریو ۱ آسیب.

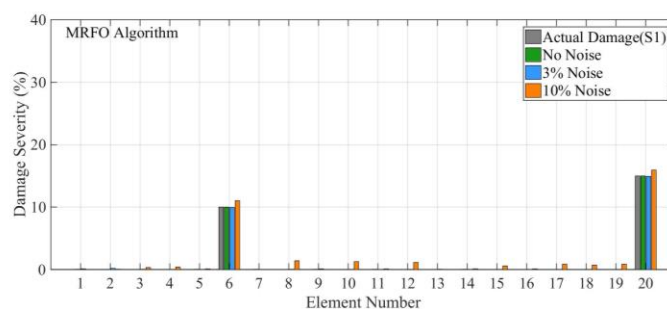
شکل ۵- منحنی همگرایی برای سناریو آسیب ۱ و ۲ تحت سطوح نویز متغیر (الگوریتم IMRFO)

همچنین نمودار همگرایی نشان می‌دهد که این الگوریتم در هر دو سناریوی آسیب و تحت هر سه سطح نویز توانسته است تابع هدف را بهینه نماید. همانطور که مشاهده می‌شود تقریباً در همه حالات مسیر همگرایی یکسان بوده است و از پایداری خوبی برخوردار است. با این وجود وجود نویز تنها در مقدار نهایی همگرایی تاثیر گذاشته است و در سطوح بالاتری این اتفاق می‌افتد.

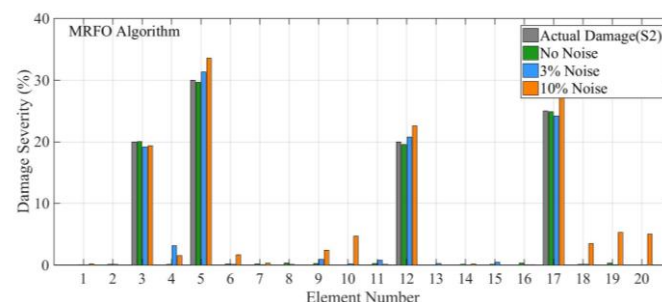
همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی سناریوهای آسیب و سطوح نویز متفاوت، تقریباً پس از ۲۵۰ تکرار به نقطه بهینه قابل قبول رسیده و همگرایی اتفاق می‌افتد.

به منظور درک بیشتر تغییرات ایجاد شده در الگوریتم IMRFO، شناسایی آسیب با الگوریتم MRFO نیز انجام شد و در شکل ۶ نتایج شناسایی آسیب در برابر ۳ حالت نویزی آورده شده است. در شکل ۷ نمودار همگرایی تابع هدف نشان داده شده است.

الگوریتم IMRFO در هر دو سناریو و در شرایط بدون نویز، عملکرد بسیار دقیقی در شناسایی محل و شدت آسیب داشت. در هر دو سناریو هیچ عضو سالمی به عنوان آسیب‌دیده تشخیص داده نشد. در سناریو ۱ با نویز ۳ درصد نیز محل و شدت آسیب به درستی شناسایی شد و مجدداً هیچ عضو سالمی به اشتباه علامت‌گذاری نشد. با افزایش نویز به ۱۰ درصد، همچنان مکان آسیب‌ها به درستی شناسایی شد و شدت آسیب‌ها نیز با دقت قابل قبولی تخمین زده شد البته که تنها چند عضو سالم با شدت آسیب بسیار کم به عنوان آسیب‌دیده تشخیص داده شدند که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. در سناریو ۲ با نویز ۳ درصد نیز با دقت بسیار خوبی محل و شدت آسیب شناسایی شد و با وجود نویز ۱۰ درصد، تنها تعداد بسیار کمی از اعضا سالم با بیشینه درصد آسیب ۱/۴٪ آسیب‌دیده نشان داده شدند. در مجموع می‌توان گفت این الگوریتم در شرایط نویزی عملکرد قابل قبول و دقیقی دارد.



الف) سناریو ۱ آسیب.



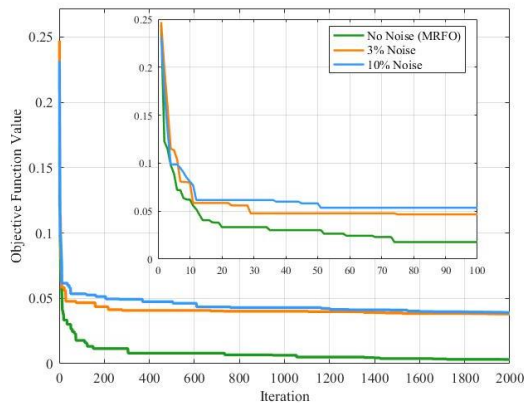
ب) سناریو ۲ آسیب.

شکل ۶- محل و شدت آسیب شناسایی شده برای سناریو آسیب ۱ و ۲ تحت سطوح نویز متغیر (الگوریتم MRFO)

سالم با شدت آسیب بسیار ناچیز (حداکثر ۰/۴٪) تشخیص داده شدند. در حضور نویز ۳٪ در سناریو ۱، مکان و شدت آسیب به درستی شناسایی شد و هیچ عضو سالمی به اشتباه علامت‌گذاری نشد. با افزایش نویز به ۱۰٪، مکان آسیب‌ها

الگوریتم MRFO در شناسایی مکان و شدت آسیب در دو سناریوی مختلف و در شرایط بدون نویز، دقت بسیار بالایی نشان داد. در سناریو ۱، هیچ عضو سالمی به اشتباه به عنوان آسیب‌دیده شناسایی نشد. در سناریو ۲، اعضای

شدند. در سناریو ۲ با نویز ۳٪، برخی اعضای سالم به اشتباه آسیب‌دیده تشخیص داده شدند، اما شدت آن‌ها پایین بود (حداکثر ۰/۹٪، به جز یک المان با شدت نادرست ۳/۲٪).



ب) سناریو ۲ آسیب.

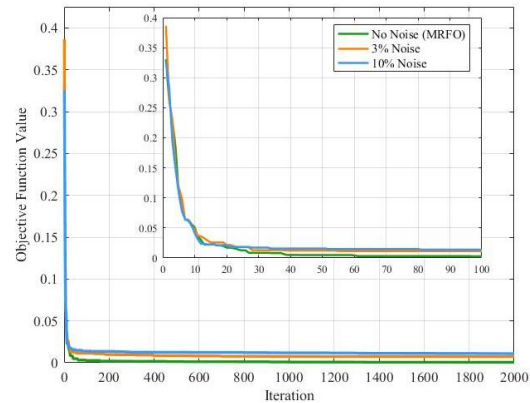
شکل ۷- منحنی همگرایی برای سناریو آسیب ۱ و ۲ تحت سطوح نویز متغیر (الگوریتم MRFO)

را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا داد. نگاشت Tent با ایجاد توزیع یکنواخت و تصادفی راه‌حل‌های اولیه، کیفیت شروع فرایند بهینه‌سازی را بهبود بخشید و از تمرکز زودهنگام در نواحی غیربهینه جلوگیری کرد. استراتژی جستجوی دوطرفه با کاوش هم‌زمان در جهت‌های بهینه و غیربهینه، دامنه جستجو را گسترش داد و توانایی بهره‌برداری الگوریتم را، به‌ویژه در مراحل اولیه تقویت کرد. همچنین، پرواز لوی در مرحله جستجوی چرخشی با استفاده از گام‌های تصادفی، امکان خروج از بهینه‌های محلی را فراهم نمود و کاوش مؤثری را در فضای جستجو تضمین کرد. این استراتژی‌ها تعادل بین کاوش و بهره‌برداری را بهبود بخشید.

به‌منظور مقایسه بیشتر عملکرد الگوریتم IMRFO، نتایج شناسایی آسیب با الگوریتم WOA و MRFO نیز تحت حالات مختلف نویز و در دو سناریو موجود مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نتایج شناسایی آسیب آورده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نمودار همگرایی تابع هدف آورده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم IMRFO در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر عملکرد مطلوب‌تری داشته و همچنین در برابر نویز دقت بالایی دارد و با جستجوی پراکنده از گیر افتادن در بهینه‌های محلی دوری می‌کند و

همچنان درست تشخیص داده شد و شدت آسیب با اختلاف اندک تخمین زده شد، اما برخی اعضای سالم با شدت نادرست حداکثر ۱/۴٪ به‌عنوان آسیب‌دیده گزارش



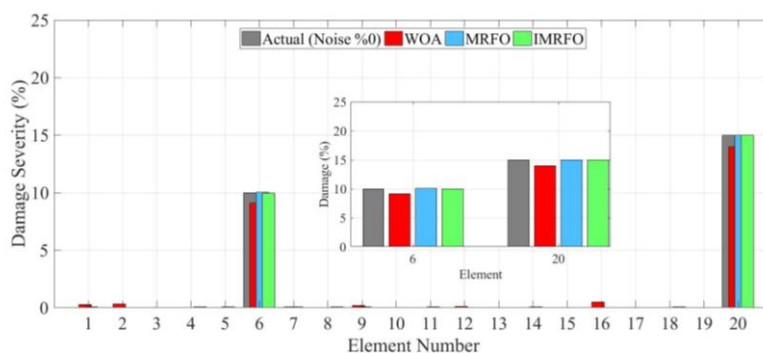
الف) سناریو ۱ آسیب.

در نویز ۱۰٪، الگوریتم با چالش مواجه شد، اما مکان آسیب‌ها را درست شناسایی کرد و شدت آسیب با اختلاف اندک تخمین زده شد، درحالی‌که اعضای سالم با شدت نادرست حداکثر ۳/۵٪ گزارش شدند.

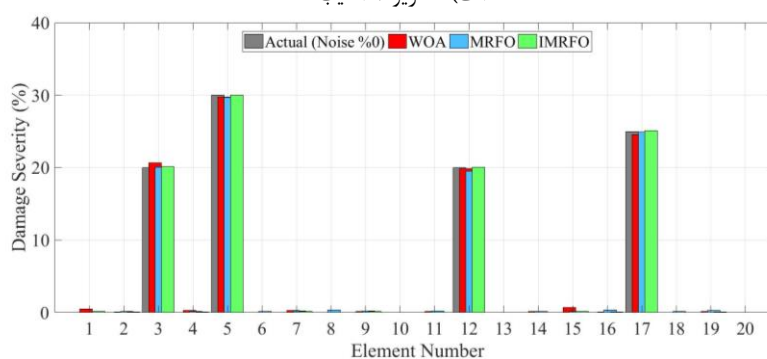
نمودار همگرایی الگوریتم MRFO نشان‌دهنده توانایی آن در کاهش تابع هدف در هر دو سناریوی آسیب تحت سه سطح نویز (۰٪، ۳٪ و ۱۰٪) است. در حالت بدون نویز، در هر دو سناریو، تابع هدف با پرش‌های اولیه به سمت نقطه بهینه کاهش یافت و سپس با شیب مناسب و شکستگی‌هایی به همگرایی نزدیک شد، به‌طوری‌که در حدود تکرار ۶۰۰ به نزدیک صفر رسید. با افزودن نویز ۳٪، الگوریتم همچنان همگرایی را حفظ کرد، اما با شیب کندتر و در مقادیر بالاتری نسبت به حالت بدون نویز همگرا شد. در نویز ۱۰٪، رفتار مشابهی مشاهده شد، اما مقدار نهایی تابع هدف کمی بیشتر از حالت نویز ۳٪ بود. این نتایج نشان می‌دهند که MRFO در شرایط بدون نویز عملکرد بسیار مطلوبی دارد، اما در حضور نویز، با وجود همگرایی، مقادیر غیرصفر تابع هدف و احتمال گیر افتادن در بهینه‌های محلی دقت شناسایی آسیب را کاهش می‌دهد.

نتایج بررسی نشان داد که IMRFO با بهره‌گیری از سه استراتژی کلیدی عملکرد الگوریتم استاندارد MRFO

همواره به سمت جواب بهتر حرکت می‌کند. همچنین برای تمامی حالات مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های به کار رفته توانسته‌اند به خوبی تابع هدف پیشنهادی را بهینه کرده و به سمت بهترین جواب حرکت کنند. این امر توانایی و دقت قابل قبول تابع هدف پیشنهادی را نشان می‌دهد.

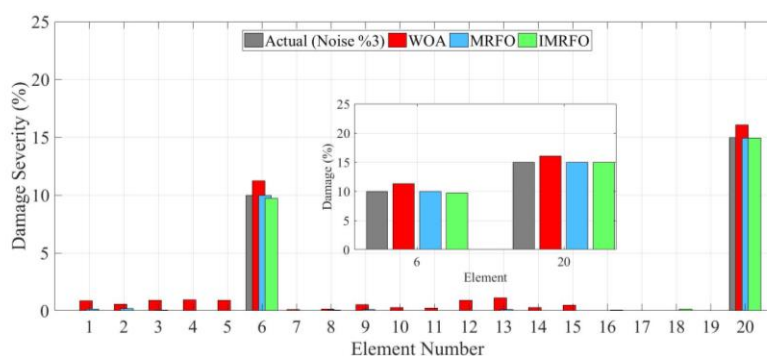


الف) سناریو ۱ آسیب

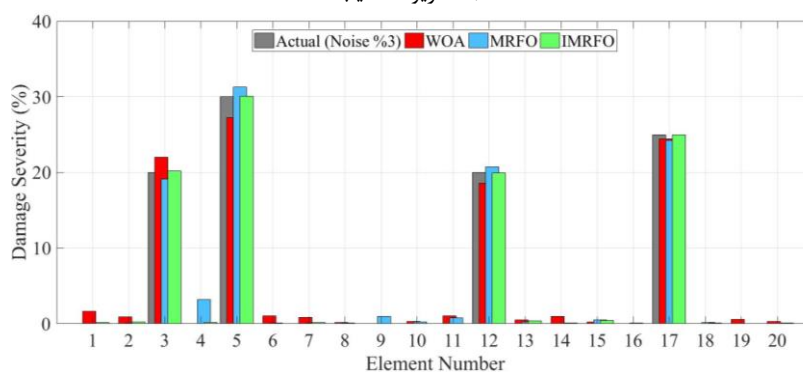


ب) سناریو ۲ آسیب

شکل ۸- نتایج شناسایی آسیب در سناریو ۱ و ۲، نویز صفر٪ (تمام الگوریتم‌ها).

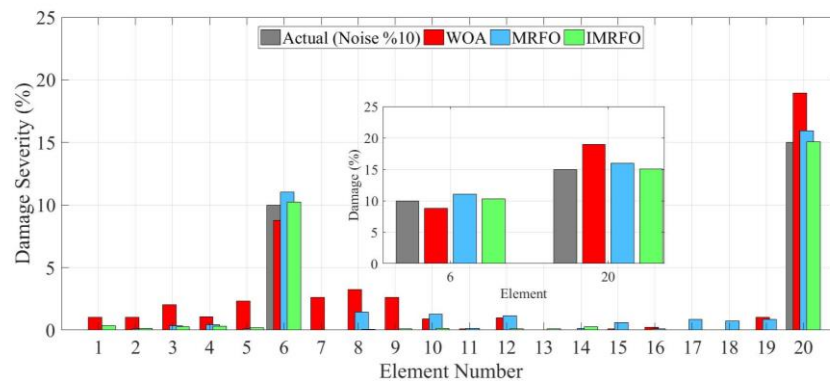


الف) سناریو ۱ آسیب.

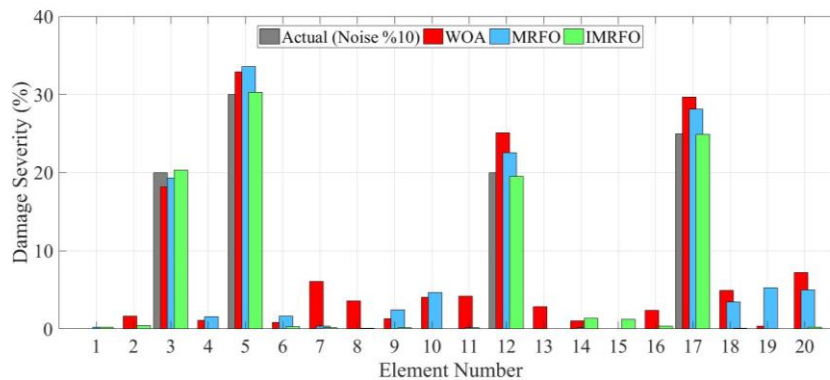


ب) سناریو ۲ آسیب.

شکل ۹- نتایج شناسایی آسیب در سناریو ۱ و ۲، نویز ۳٪ (تمام الگوریتم‌ها).

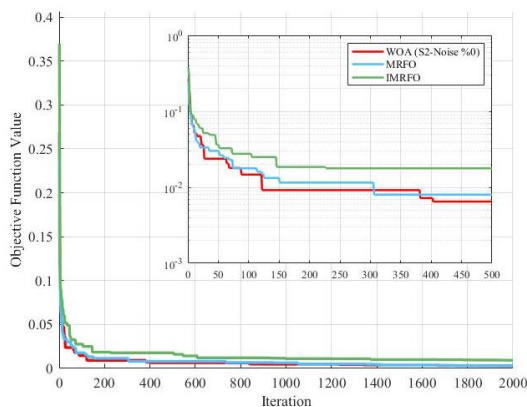


الف) سناریو ۱ آسیب

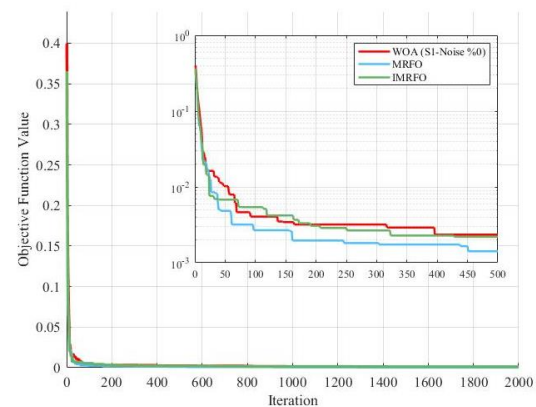


ب) سناریو ۲ آسیب.

شکل ۱۰- نتایج شناسایی آسیب در سناریو ۱ و ۲، نویز ۱۰٪ (تمام الگوریتم‌ها)



ب) سناریو ۲ آسیب.



الف) سناریو ۱ آسیب.

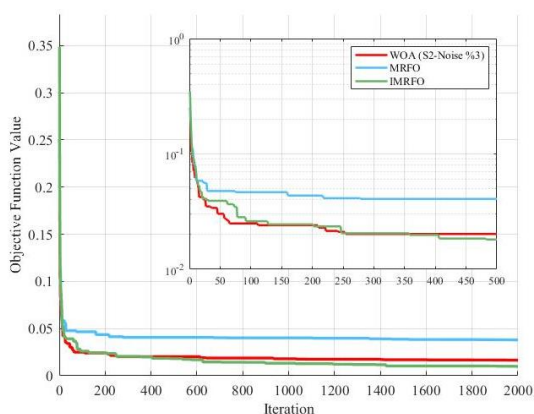
شکل ۱۱- منحنی همگرایی برای هر دو سناریو آسیب و نویز صفر٪

۵- تاثیر پارامترهای تابع هدف در دقت شناسایی آسیب

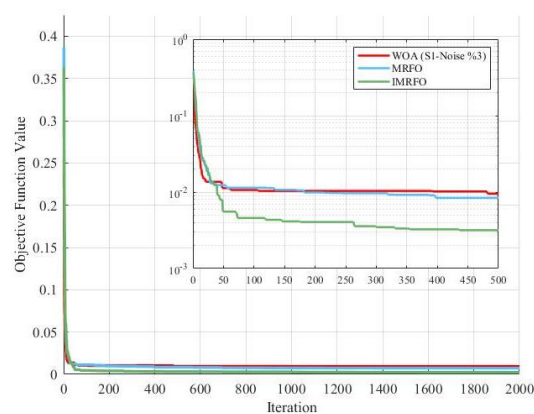
عملکرد توابع هدف، الگوریتم MRFO به کار گرفته شد. از داده‌های سه مود اول سازه برای فرمول‌بندی این توابع هدف استفاده گردید. برای ارزیابی نتایج شناسایی آسیب، الگوریتم MRFO برای هر تابع هدف ۴۰ بار اجرا شد و نتایج ثبت شد. به منظور بررسی تفاوت‌های عملکرد بین

به منظور نمایش عملکرد تابع هدف پیشنهادی و تاثیر پارامترهای این تابع با حذف پارامترهای انتخابی تابع هدف، شناسایی آسیب با در نظر گرفتن سناریو دوم آسیب تحت نویز ۱۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه

توابع هدف، یک تابع خطا تعریف شد تا میزان دقت و کارایی آن‌ها در شناسایی آسیب مقایسه شود.

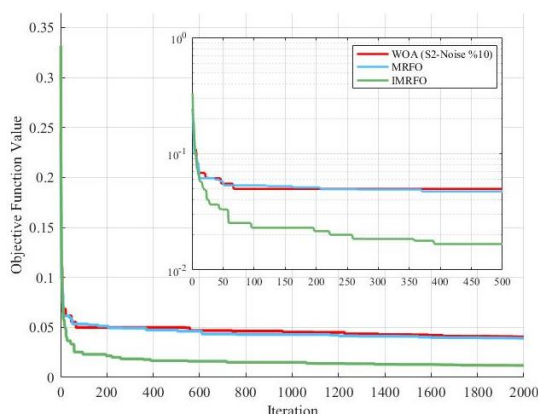


ب) سناریو ۲ آسیب.

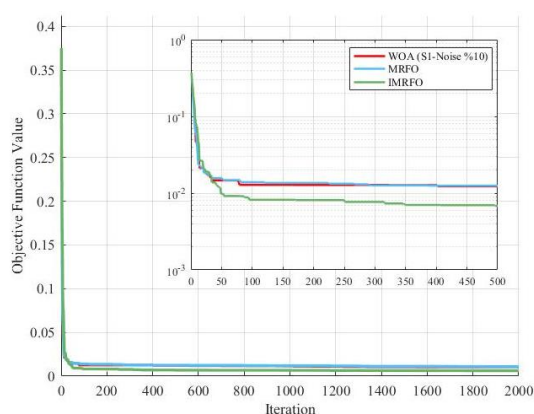


الف) سناریو ۱ آسیب.

شکل ۱۲- منحنی همگرایی برای هر دو سناریو آسیب و نویز ۳٪.



ب) سناریو ۲ آسیب.



الف) سناریو ۱ آسیب.

شکل ۱۳- منحنی همگرایی برای هر دو سناریو آسیب و نویز ۱۰٪.

$$E_4 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_f} S_{fi}}{(N_e - N_m) \times 100} \right) \times 100 \quad (30)$$

در این معادلات N_{us} تعداد ران‌های ناموفق در شناسایی آسیب، N_T تعداد کل ران‌ها، N_m تعداد المان‌های آسیب دیده در سناریو خرابی، N_f تعداد المان‌های سالمی که به اشتباه آسیب‌دیده شناسایی شده‌اند (آسیب بیشتر از ۱٪)، N_e تعداد کل المان‌ها، S_m شدت آسیب المان‌های آسیب دیده در سناریو خرابی، S_d شدت آسیب المان‌های سالمی دیده شناسایی شده، S_f شدت آسیب المان‌های سالمی که به اشتباه آسیب دیده شناسایی شده‌اند. در جدول ۳ خطای محاسبه شده برای شناسایی آسیب با حذف پارامترهای تابع هدف آورده شده است.

فرمول بندی این تابع خطا در معادله (۲۶) نشان داده شده است:

$$E_T = 0.2E_1 + 0.4E_2 + 0.05E_3 + 0.35E_4 \quad (26)$$

در این معادله هر یک از پارامترهای تابع خطا به صورت معادلات (۲۷) تا (۳۰) فرموله شده‌اند.

$$E_1 = (N_{us} / N_t) \times 100 \quad (27)$$

$$E_2 = \left(\sum_{i=1}^{N_m} \left| \frac{S_{mi} - S_{di}}{S_{mi}} \right| / N_m \right) \times 100 \quad (28)$$

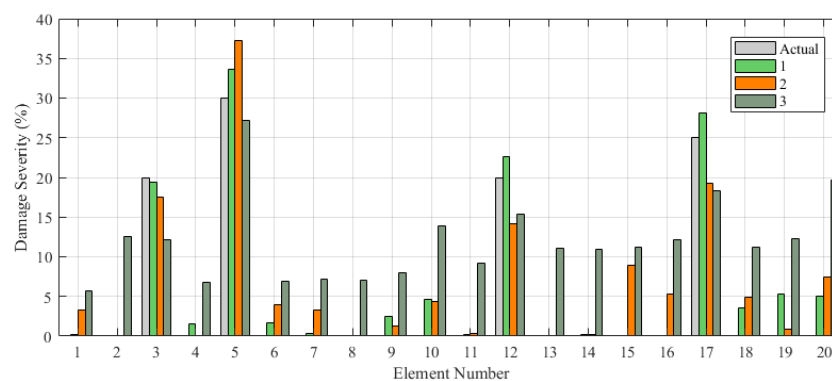
$$E_3 = \left(\frac{N_f}{(N_e - N_m)} \right) \times 100 \quad (29)$$

استخراج شده است. این نمایش بصری امکان مقایسه عملکرد توابع هدف را با حذف پارامترهای آن در شناسایی مکان و شدت آسیب فراهم می‌سازد.

برای مقایسه دقیق‌تر توابع هدف، نتایج شناسایی آسیب این توابع، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. مقادیر آسیب شناسایی شده در این نمودارها از میانگین نتایج موافقی که در ۴۰ اجرای مستقل بدست آمده‌اند،

جدول ۳- خطای محاسبه شده برای توابع مختلف

ET	E4	E3	E2	E1	پارامترها در تابع هدف	
۱۰/۲۷	۱/۵۱	۴۳/۷۵	۱۶/۳۹	۵	$[\omega^2], [\phi], [MSE]$	۱
۱۸/۰۹	۲/۶۷	۵۶/۲۵	۲۰/۸۵	۳۰	$[\omega^2], [\phi]$	۲
۳۰/۶۶	۱۰/۳۱	۱۰۰	۲۳/۸۴	۶۲/۵	$[\phi]$	۳



شکل ۱۴- مقایسه تاثیر پارامترهای تابع هدف در شناسایی آسیب

این فرمول‌بندی حساسیت بالایی نسبت به کاهش سختی موضعی و کلی ایجاد می‌کند و امکان شناسایی قابل‌اعتماد آسیب در شرایط نویزی را فراهم می‌سازد.

اثربخشی تابع هدف با استفاده از سه الگوریتم بهینه‌یابی شامل WOA، MRFO، IMRFO ارزیابی شد. بهینه‌یابی تابع هدف با استفاده از این الگوریتم‌ها در دو سناریوی آسیب و سه سطح نویز (صفر، ۳ و ۱۰٪) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان دادند که تابع هدف پیشنهادی با دقت و سرعت مناسبی در شناسایی آسیب عمل می‌کند. اگرچه همه الگوریتم‌ها توانایی بهینه‌سازی را تا حدی نشان دادند، اما دقت و رفتار همگرایی آنها متفاوت بود. IMRFO در محیط‌های نویزی عملکرد قوی‌تری داشت و به طور کلی سرعت همگرایی را ۵۰٪ بهبود بخشید.

همانطور که مشاهده می‌شود تابع هدفی که تنها از یک پارامتر مودال استفاده نموده است با خطای بسیار مواجه شده است. با اضافه کردن پارامتر فرکانسی به توابع هدف عملکرد آن بهبود یافت اما هنوز برای یافتن دقیق محل آسیب دچار سردرگمی بود، از این رو پارامتر انرژی کرنشی نیز به تابع هدف اضافه گردید تا با اعمال شرایط محلی هر عضو، بتواند در شناسایی محل آسیب کمک کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک رویکرد مبتنی بر به‌روزرسانی مدل برای شناسایی دقیق آسیب‌های سازه‌ای در قاب‌های خمشی ارائه گردید. چارچوب پیشنهادی یک تابع هدف نوآورانه معرفی نمود که سه ویژگی کلیدی دینامیکی: فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و انرژی کرنشی مدال استخراج‌شده از سه مود ارتعاشی نخست را ادغام می‌کند.

نتایج بررسی نشان داد که با اضافه کردن پارامتر انرژی کرنشی به تابع هدف، توانایی شناسایی دقیق المان آسیب‌دیده افزایش یافت و خطای اندازه‌گیری در شناسایی اشتباه عضو سالم به عنوان آسیب‌دیده به شدت کاهش یافت. این مقدار با بهبود ۲۲٪ همراه بود.

نتایج شبیه‌سازی، مبتنی بر میانگین ۲۰ اجرای مستقل، قدرت و قابلیت اطمینان چارچوب پیشنهادی را تأیید کرد. الگوریتم IMRFO در تمامی شرایط نویزی با خطای کمتر از ۲ درصد همراه بود. این نتایج تأثیرات موارد بهبودیافته در الگوریتم MRFO را نشان می‌دهد.

در سناریوهای آسیبی که المان‌های کمتر، آسیب دیده لحاظ شده‌اند، هر دو الگوریتم MRFO و IMRFO در شرایط بدون نویز عملکرد قدرتمندی داشته‌اند. با اعمال نویز کم الگوریتم MRFO دچار کمی خطا در شدت آسیب وارده شده اما الگوریتم IMRFO با دقت خوبی شناسایی را انجام داده است. در برابر نویز ۱۰ درصد الگوریتم MRFO تعداد بیشتری المان سالم را به عنوان آسیب‌دیده نشان داد که این امر در الگوریتم IMRFO با دقت خوبی بهبود یافت.

با افزایش المان‌های آسیب‌دیده باز هم در شرایط بدون نویز هر دو الگوریتم دقت خوبی در شناسایی آسیب

داشتند اما با وجود نویز ۳ درصد الگوریتم MRFO دچار خطایی در محاسبه شدت و تعداد المان‌های سالم به عنوان آسیب‌دیده گردید که این امر با وجود نویز ۱۰ درصد تشدید یافت. اما الگوریتم IMRFO در تمامی شرایط نویزی عملکرد قابل قبولی اراده داد.

به‌طور خلاصه، چارچوب پیشنهادی با یک تابع هدف نوآورانه و الگوریتم IMRFO راهکاری دقیق، مقاوم در برابر نویز و از نظر محاسباتی بهینه برای شناسایی آسیب ارایه می‌دهد.

با وجود دقت بالای روش پیشنهادی در شناسایی محل و شدت آسیب، این پژوهش با چند محدودیت همراه است. آسیب‌ها صرفاً به صورت کاهش سختی المان‌ها و در قاب‌های خمشی دوبعدی مدل‌سازی شده‌اند و اثرات ترک‌ها، رفتار غیرخطی سازه و اثرات مدل‌سازی اتصالات و تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین تمامی شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB انجام شده و از داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی استفاده نگردیده است. بنابراین، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود عملکرد روش پیشنهادی بر روی سازه‌های بیشتر، در حضور رفتار غیرخطی و شرایط مرزی واقعی بررسی گردد.

References

- [1] Rytter A. Vibrational based inspection of civil engineering structures.
- [2] Farrar CR, Worden K. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007 Feb 15; 365(1851): 303-315. doi: 10.1098/rsta.2006.1928
- [3] Gulgec NS, Takáč M, Pakzad SN. Structural damage detection using convolutional neural networks. In *Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3: Proceedings of the 35th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2017*. 2017 Jun 8; 331-337. doi: 10.1007/978-3-319-54858-6_33
- [4] Gulgec NS, Takáč M, Pakzad SN. Convolutional neural network approach for robust structural damage detection and localization. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2019 May 1; 33(3): 04019005. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000820
- [5] Tibaduiza Burgos DA, Gomez Vargas RC, Pedraza C, Agis D, Pozo F. Damage identification in structural health monitoring: A brief review from its implementation to the use of data-driven applications. *Sensors*. 2020 Jan 29; 20(3): 733. doi: 10.3390/s20030733
- [6] Bhatt P. Maximum marks maximum knowledge in physics. Allied Publishers; 2010.
- [7] Soleimani Nezhad S, Khademian F, Naderpour H, Kalantari SM, Fakharian P. Signal processing-based damage detection of steel braced frame subjected to consequent excitations. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2024 Dec; 9(12): 454. doi: 10.1007/s41062-024-01762-5

- [8] Ezzodin A, Ghodrati Amiri G, Naderpour H, Raissi Dehkordi M. A Novel Damage Detection Method of Reinforced Concrete Frames Using Signal Processing and Extracted Near-Fault Fling-Step Pulses. *Shock and Vibration*. 2022; 2022(1): 9824882. doi: **10.1155/2022/9824882**
- [9] Sha G, Radzieński M, Cao M, Ostachowicz W. A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019 Oct 1; 132: 335-352. doi: **10.1016/j.ymssp.2019.06.027**
- [10] He WY, Ren WX. Structural damage detection using a parked vehicle induced frequency variation. *Engineering Structures*. 2018 Sep 1; 170: 34-41. doi: **10.1016/j.engstruct.2018.05.082**
- [11] Allemang RJ. A correlation coefficient for modal vector analysis. In *Proc. of the 1st IMAC 1982*; 110-116.
- [12] Ewins DJ. *Modal Testing: Theory and Practice*. Somerset, England: Research Studies Press Ltd. 1984.
- [13] Khatir A, Tehami M, Khatir S, Abdel Wahab M. Multiple damage detection and localization in beam-like and complex structures using co-ordinate modal assurance criterion combined with firefly and genetic algorithms. *Journal of Vibroengineering*. 2016 Dec 31; 18(8): 5063-573. doi: **10.21595/jve.2016.17026**
- [14] Khanahmadi M, Gholhaki M, Rezaifar O, Dezhkam B. Signal processing methodology for detection and localization of damages in columns under the effect of axial load. *Measurement*. 2023 Apr 1; 211: 112595. doi: **10.1016/j.measurement.2023.112595**
- [15] Khanahmadi M, Mirzaei B, Dezhkam B, Rezaifar O, Gholhaki M, Amiri GG. Vibration-based health monitoring and damage detection in beam-like structures with innovative approaches based on signal processing: A numerical and experimental study. *In Structures* 2024 Oct 1; 68: 107211. doi: **10.1016/j.istruc.2024.107211**
- [16] Mishra M, Barman SK, Maity D, Maiti DK. Ant lion optimisation algorithm for structural damage detection using vibration data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2019 Feb 13; 9(1): 117-136. doi: **10.1007/s13349-018-0318-z**
- [17] Wei Z, Liu J, Lu Z. Structural damage detection using improved particle swarm optimization. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2018 Jun 3; 26(6): 792-810. doi: **10.1080/17415977.2017.1347168**
- [18] Hoseini Vaez SR, Fallah N. Damage detection of thin plates using GA-PSO algorithm based on modal data. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2017 Mar; 42(3): 1251-1263. doi: **10.1007/s13369-016-2398-6**
- [19] Aghajani R, Azizpour Miandoab O, Kourehli SS, Khodabandehlou A. Identification of Damage and Model Updating Using Residual Force Modal Analysis and Optimization Algorithms. *Civil Infrastructure Researches*. 2025 May 22; 11(1): 87-104. doi: **10.22091/cer.2025.11502.1584** [In Persian]
- [20] Ciambella J, Pau A, Vestroni F. Modal curvature-based damage localization in weakly damaged continuous beams. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019 Apr 15; 121: 171-182. doi: **10.1016/j.ymssp.2018.11.012**
- [21] Bagherkhani A, Baghlani A. Enhancing the curvature mode shape method for structural damage severity estimation by means of the distributed genetic algorithm. *Engineering Optimization*. 2021 Apr 3; 53(4): 683-701. doi: **10.1080/0305215X.2020.1746294**
- [22] Khiem NT. Mode shape curvature of multiple cracked beams and its use for crack identification in beam-like structures. *Vietnam Journal of Mechanics*. 2020 Jun 29; 42(2): 123-132. doi: **10.15625/0866-7136/14707**
- [23] Chopra AK. *Dynamics of structures theory and*. ISBN: 0-13-8552. 1995: 2-4.
- [24] Fakharian P, Naderpour H. Damage severity quantification using wavelet packet transform and peak picking method. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2022 Feb 1; 27(1): 04021063. doi: **10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000639**
- [25] Ghannadi P, Kourehli SS. Structural damage detection based on MAC flexibility and frequency using moth-flame algorithm. *Struct. Eng. Mech.* 2019 Jan 1; 70(6): 649-659. doi: **10.12989/sem.2019.70.6.649**
- [26] Wang S, Xu M. Modal strain energy-based structural damage identification: a review and comparative study. *Structural Engineering International*. 2019 Apr 3; 29(2): 234-248. doi: **10.1080/10168664.2018.1507607**
- [27] Shi Z, Law SS, Zhang L. Structural damage detection from modal strain energy change. *Journal of engineering mechanics*. 2000 Dec; 126(12): 1216-1223. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:12(1216)**
- [28] Cha YJ, Buyukozturk O. Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015 May; 30(5): 347-358. doi: **10.1111/mice.12122**
- [29] Mohamadi Dehcheshmeh M, Ghodrati Amiri G, Zare Hosseinzadeh A, Torbatinejad V. Structural damage detection based on modal data using moth-flame optimisation algorithm. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. 2022 Feb; 175(2): 79-93. doi: **10.1680/jstbu.18.00121**

- [30] Amiri GG, Dehcheshmeh MM, Hosseinzadeh AZ. Feasibility study on model-based damage detection in shear frames using pseudo modal strain energy. *Smart Structures and Systems, An International Journal*. 2020 Jan; 25(1): 47-56.
- [31] Chen Z, Liu Q, Pan C. Structural damage detection based on modal strain energy assurance criterion using adaptive region shrinkage assisted IGOA. *InStructures*. 2023 Dec 1; 58: 105458. **doi: 10.1016/j.istruc.2023.105458**
- [32] Hao J, Zhu X, Li J. Structural damage detection for spatial frame structures with semi-rigid joints using multiple set wireless measurements. *Journal of Vibration and Control*. 2024 Oct 9: 10775463241290043. **doi: 10.1177/10775463241290043**
- [33] Nguyen QT, Livaoğlu R. Modal strain energy based enhanced approaches for damage detection and severity estimation. *Engineering Failure Analysis*. 2023 Apr 1; 146: 107142. **doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107142**
- [34] Soyoz S. Model updating techniques for structures under seismic excitation. In *Seismic Structural Health Monitoring: From Theory to Successful Applications*. 2019 Apr 25; 199-216. **doi: 10.1007/978-3-030-13976-6_8**
- [35] Soyoz S, Feng MQ. Long-term monitoring and identification of bridge structural parameters. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2009 Feb; 24(2): 82-92. **doi: 10.1111/j.1467-8667.2008.00572.x**
- [36] Bekdaş G, Nigdeli SM, Kayabekir AE, Yang XS. Optimization in civil engineering and metaheuristic algorithms: a review of state-of-the-art developments. *Computational intelligence, optimization and inverse problems with applications in engineering*. 2018 Sep 26: 111-137. **doi: 10.1007/978-3-319-96433-1_6**
- [37] Bassoli E, Vincenzi L, D'Altri AM, de Miranda S, Forghieri M, Castellazzi G. Ambient vibration-based finite element model updating of an earthquake-damaged masonry tower. *Structural Control and Health Monitoring*. 2018 May; 25(5): e2150. **doi: 10.1002/stc.2150**
- [38] Ubertini F, Cavalagli N, Kita A, Comanducci G. Assessment of a monumental masonry bell-tower after 2016 Central Italy seismic sequence by long-term SHM. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018 Feb; 16(2): 775-801. **doi: 10.1007/s10518-017-0222-7**
- [39] Zhao W, Zhang Z, Wang L. Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2020 Jan 1; 87: 103300. **doi: 10.1016/j.engappai.2019.103300**
- [40] Qu P, Yuan Q, Du F, Gao Q. An improved manta ray foraging optimization algorithm. *Scientific Reports*. 2024 May 5; 14(1): 10301. **doi: 10.1038/s41598-024-59960-1**