



Damage Detection Based on Modal Parameters and Dynamic Responses using by Enhanced Grey Wolf Optimization

Y., Shabani, P., Ghaderi

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Structural damage causes a reduction in stiffness of some elements of structure and gives rise to some changes in structures' modal parameters (natural frequencies, mode shapes, etc.) and dynamic responses (acceleration, velocity, and displacement). Hence, intact structures' data is different from damaged structures' data and can be used to detect structural damages. Many techniques are recently utilized to facilitate damage detection, some salient examples of which are non-destructive methods and using of structure responses. The main purpose of this paper is to present a method for estimating structural damage detection based on the measurement of modal parameters and comparing its results with results of measurement of dynamic responses in a limited number of degrees of freedom. To detect the damage, two objective functions have been defined: one with modal parameters and the other one with structural dynamic responses data. For optimizing the objective functions, a new hybrid algorithm including GWO and PSO has been designed and its results have been compared to GA and PSO. Two examples including a ten-story shear building and a ten-element truss are considered and the efficiency of the proposed strategy in damage detection is assessed. The results indicate that the proposed strategy has acceptable performance.

Review History:

Received: Jul. 14, 2019
Revised: Aug. 29, 2019
Accepted: Sep. 18, 2019
Available Online: Dec. 09, 2019

Keywords:

Structural damage detection
Modal parameters
Dynamic response
Optimization algorithm
Metaheuristic hybrid algorithms

1. Introduction

Damages to the elements of a structure may be caused by sudden incidents, such as earthquakes or high winds, or maybe gradually occurred due to deterioration and bad maintenance [1, 2]. The main purpose of this paper is to present a new method for estimating structural damages based on the measurement of modal parameters or system's response and comparing them with the supposed response of the undamaged structure. To detect damages in civil structures two objective functions have been defined: one with modal parameters and the other one with the measured acceleration of the roof. To minimize the objective functions, a new hybrid algorithm based on Gray Wolf Optimization (GWO) and Particle Swarm Optimization (PSO) is proposed. The performance of this method in damage identification is compared to the Genetic Algorithm (GA) and PSO.

2. Proposed Method for Damage Detection Problem

The modal properties of a structure are found from the following eigenvalue problem:

$$K\phi_i - \omega_i^2 M\phi_i = 0 \quad (1)$$

When an element of the structure is damaged, its stiffness is changed as Eq. (2). Here $d_e \in [0, +1]$ denotes the damage index.

$$k_d^e = k^e (1 - d_e) \quad (2)$$

The values of the damage indices are found by a smart trial and error procedure. First, a set of estimated values for the damage indices are assumed. Then, the response of the structure is computed for those indices. Next, that response is compared with the real measured response of the structure. This is performed by the objective function. A smaller value of the objective function means that the estimated indices are close to their real value. Based on the objective function's value the estimations of the indices are updated. This procedure is continued until the desired accuracy is reached. Objective Eqs. (3) and (4) are used in this study. They are defined using the natural frequencies and the measured acceleration of the roof.

$$f_1 = \sum_{i=1}^N |\omega_{m,i} - \omega_{c,i}| / |\omega_{m,i}| \quad (3)$$

$$f_2 = \left(\int_{t=0}^T |a_m - a_c| dt \right) / \left(\int_{t=0}^T |a_m| dt \right) \quad (4)$$

The damage indices are estimated by searching for a minimal solution of the objective functions. For this purpose, a new hybrid of Gray Wolf Optimization algorithm (GWO) and Particle Swarm Optimization (PSO) is presented in this study.

*Corresponding author's email: p_ghaderi@iust.ac.ir



2.1. Particle Swarm Optimization Algorithm

This algorithm [3] can be summarized as follows:

- 1) Generate the initial population and evaluate its fitness using the objective function.
- 2) Determine best-so-far solutions.
- 3) Update locations and velocities of the new solutions.
- 4) Iterate the above steps until the desired termination condition is met. The required equations are summarized below:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}] \tag{5}$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \tag{6}$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \tag{7}$$

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + r_1c_1(p_i(t) - x_i(t)) + r_2c_2(p_g(t) - x_i(t)) \tag{8}$$

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \times t / T \tag{9}$$

2.2. Gray Wolf Optimization Algorithm

The first, second, and third best solutions are labeled as α , β , and δ . The rest proper solutions are labeled as γ . The required equations for generating new solutions are summarized below:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \tag{10}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \tag{11}$$

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r}_1 - a \tag{12}$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \tag{13}$$

$$D_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, D_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \tag{14}$$

$$D_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}|$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (D_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (D_\beta), \tag{15}$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (D_\delta)$$

$$\vec{X}(t+1) = (\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3) / 3 \tag{16}$$

2.3. Proposed Algorithm (GW-PS)

Fig. 1 presents the flowchart of the proposed algorithm. It is named GW-PS and is based on the Gray Wolf Optimization Algorithm enhanced by elements from the Particle Swarm Optimization algorithm.

3. Numerical Example

A 10-story building is subjected to El Centro (1940) earthquake and undergoes structural damages.

The objective function values and the good performance of the proposed method (GW-PS) in the identification of the damage index on the 4th floor, in comparison with Genetic Algorithm (GA) and PSO, are presented in Figs. 2 and 3.

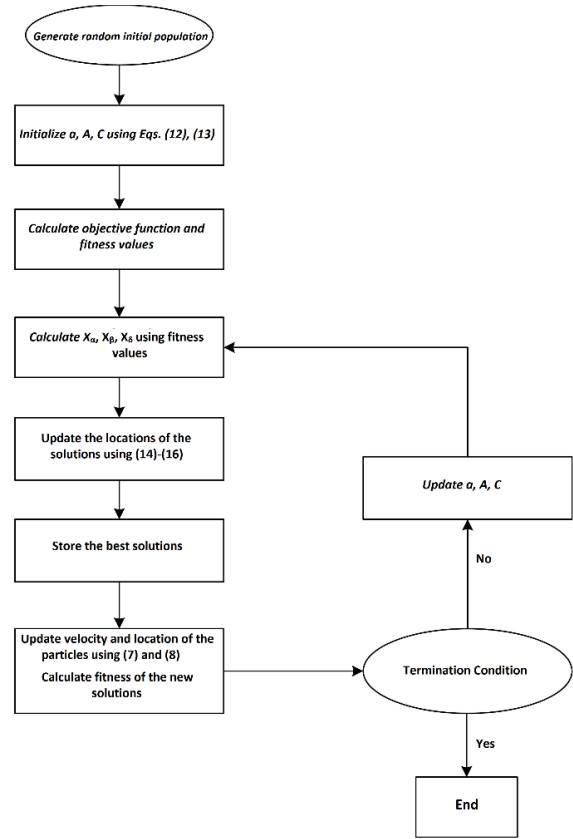


Fig. 1. Flowchart of the proposed damage detection method (GW-PS).

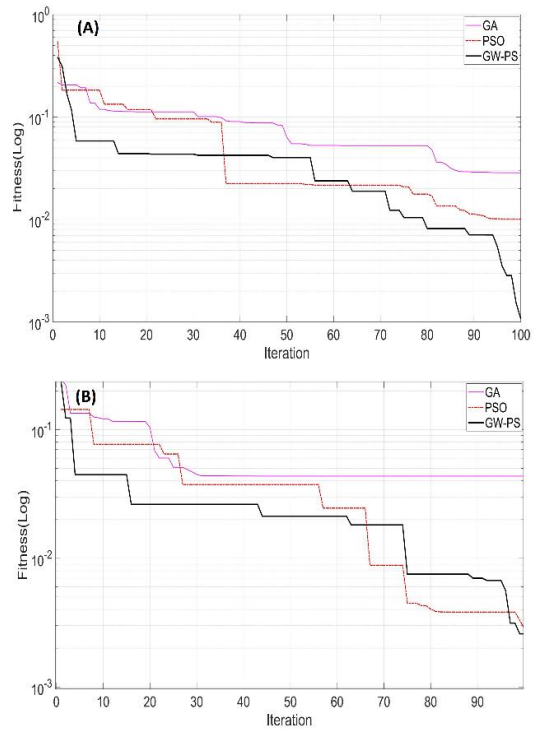


Fig. 2. Fitness values calculated from: A) Modal data. B) Measured acceleration data.

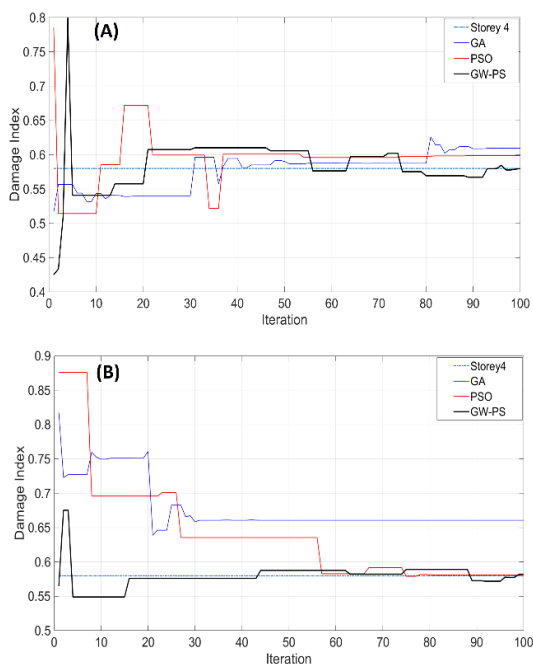


Fig. 3. The estimated damage index on the 4th floor is calculated from A) Modal data. B) Measured acceleration data.

4. Conclusions

A new method for structural damage detection based on measurement of modal parameters and comparing its results with measurement of dynamic responses in a limited number of degrees of freedom is proposed. The method is based on the Gray Wolf Optimization and Particle Swarm Optimization algorithms. The provided numerical simulations show the good performance of the proposed method in comparison with the other well-known methods such as Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization.

References

- [1] C. Ghee Koh, L. Ming See, T. Balendra, Damage detection of buildings: numerical and experimental studies, *Journal of structural engineering*, 121(8) (1995) 1155-1160.
- [2] A. Rytter, *Vibrational based inspection of civil engineering structures*, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.
- [3] R. Eberhart, J. Kennedy, *Particle swarm optimization*, in: *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*, Citeseer, 1995, pp. 1942-1948.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Y. Shabani, P. Ghaderi, *Damage Detection Based on Modal Parameters and Dynamic Responses using by Enhanced Grey Wolf Optimization*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 227-230.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16681.6330](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16681.6330)





تشخیص خرابی بر مبنای پارامترهای مودال و پاسخ دینامیکی با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته

پدرام قادری*، یاسر شعبانی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۳
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

کلمات کلیدی:

تشخیص خرابی سازه‌ها
داده‌های مودال
پاسخ دینامیکی سازه
روش‌های بهینه‌یابی
الگوریتم‌های ترکیبی فراابتکاری

خلاصه: خرابی در سازه‌ها باعث کاهش سختی در بعضی از اعضای آن می‌شود که این کاهش سختی باعث تغییر در پارامترهای مودال سازه (فرکانس طبیعی، اشکال مودی و...) و نیز باعث تغییر در پاسخ دینامیکی سازه (شتاب، سرعت و جابجایی) می‌شود. بنابراین داده‌های سازه سالم متفاوت با سازه آسیب‌دیده می‌باشد و می‌تواند به عنوان عاملی برای تشخیص خرابی مورد استفاده قرار بگیرد. اخیراً روش‌های گوناگونی برای تشخیص خرابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این بین روش‌های غیرمخرب و استفاده از پاسخ‌های سازه برای تشخیص خرابی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف از این مطالعه ارائه روشی برای برآورد مقادیر خرابی سازه بر اساس اندازه‌گیری بخش محدودی از مشخصات مودال (فرکانس طبیعی) و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی سازه (شتاب) در تعداد محدودی از درجات آزادی می‌باشد. به منظور تشخیص خرابی دو تابع هدف تعریف گردید: یکی با استفاده از پارامترهای مودال و دیگری مبتنی بر داده‌های پاسخ دینامیکی سازه. برای بهینه‌یابی این توابع، یک الگوریتم جدید از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری و ازدحام ذرات تعریف و نتایج حاصل از آن با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه شده است. دو مثال شامل سازه برشی ۱۰ طبقه و خرابی دو بعدی ۱۰ عضو در نظر گرفته می‌شود و عملکرد روش پیشنهادی در شناسایی خرابی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان دهنده کارایی قابل قبول روش پیشنهادی می‌باشد.

۱- مقدمه

[۲]:

- (۱) تشخیص وجود یا عدم وجود خرابی سازه‌ها
- (۲) تعیین موقعیت خرابی
- (۳) تعیین نوع خرابی
- (۴) تعیین شدت خرابی
- (۵) تخمین عمر باقیمانده‌ی سرویس‌دهی خرابی

در اکثر سازه‌های عمرانی مثل ساختمان‌های بلندمرتبه، برج‌ها، سدها و سازه‌های دریایی، خرابی بتدریج در طول عمر سرویس‌دهی آن‌ها تجمع می‌یابد و یا ممکن است از خرابی‌های ناگهانی ناشی از بلایای طبیعی رنج ببرند. بنابراین از نقطه نظر سرویس‌دهی و ایمنی، تشخیص خرابی سازه‌ها یک موضوع مهم می‌باشد [۱]. اگر این خرابی‌ها تشخیص داده نشوند، ممکن است ایمنی سازه کاهش یابد. در نتیجه ممکن است احتمال خرابی کل سازه بالا برود که منجر به خطرهای جانی و مالی برای افراد می‌شود. از این رو اهمیت تشخیص خرابی بیش از پیش خود را نشان می‌دهد.

فرآیند عیب‌یابی در سازه‌ها را می‌توان با توجه به سطح اطلاعاتی که از آسیب ارائه می‌دهند، در پنج مرحله تعریف کرد که عبارتند از

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: p_ghaderi@iust.ac.ir



تکیه‌گاه‌های ساده انجام دادند. آن‌ها دریافتند که فرکانس‌های طبیعی برای تشخیص خرابی در تکیه‌گاه‌های باربر الاستیک بسیار حساس‌اند [۶].

یام^۷ و همکاران یک شاخص خرابی با استفاده از اختلاف بین انحنای شکل مودی دو بعدی برای سازه سالم و آسیب‌دیده تعریف کردند و صلاحیت این شاخص را برای مولفه خرابی با استفاده از صفحه آلومینیومی ترک خورده نشان دادند [۷].

لی^۸ و همکاران دو شاخص خرابی با استفاده از انحنای شکل مودی دو بعدی به نام‌های شاخص ممان خمشی و شاخص شکل مودی کرنشی پسماند را ارائه کردند و از آن‌ها برای تعیین خرابی در یک صفحه با انتهای آزاد استفاده کردند. نتایج نشان داد که شاخص خرابی می‌تواند موقعیت خرابی را به درستی تشخیص دهد [۸].

استابز^۹ و همکاران روشی بر مبنای کاهش انرژی کرنشی مودال با استفاده از اشکال مودی در یک پل آسیب‌دیده بیان کردند. آن‌ها با محاسبه اشکال مودی سازه قبل و بعد از خرابی، موقعیت خرابی را تعیین کردند [۹].

نوبهاری و سیدپور یک روش برای تشخیص خرابی چندگانه در سیستم‌های سازه‌ای با استفاده از مفهوم انرژی کرنشی در سازه ارائه نمودند. آن‌ها برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، دو سازه معیار دارای چندین سناریوی خرابی را در نظر گرفتند. آن‌ها از یک قاب و نیز یک خرپای ۳۱ عضوی به عنوان سازه‌های معیار استفاده کردند [۱۰].

ریسلز و کاسمتکا^{۱۱} از روش بردار نیروی باقیمانده برای تخمین نواحی ممکن خرابی استفاده کردند و سپس مقدار خرابی را با استفاده از آنالیز حساسیت وزن دار مبتنی بر توسعه مرتبه اول سری تیلور از یک سیستم سازه‌ای غیرمیرا ارزیابی کردند [۱۱].

برخی دیگر از محققان روش‌های دیگری را برای تشخیص خرابی‌های سازه‌ای استفاده کردند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های همبستگی بین داده‌های مودال [۱۲]، روش تخمین پارامتر [۱۳]، ماتریس انتقال هندسی [۱۴] و توابع پاسخ فرکانسی [۱۵] اشاره کرد.

و روش‌های کلی (جامع) تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های موضعی تشخیص خرابی، معمولاً بخش کوچکی از سازه بررسی می‌گردد. برای اجرای این روش‌ها، فقط از اطلاعات سازه آسیب‌دیده استفاده می‌شود و نیازی به اطلاعات سازه سالم نمی‌باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های بازرسی چشمی، آزمایش اولتراسونیک یا فراصوتی^۱، آزمایش جریان گردابه‌ای^۲، روش ذرات مغناطیسی^۳، آزمایش رادیوگرافی^۴ و... اشاره کرد. اما این روش‌ها پرهزینه و وقت‌گیر بوده و برای پیش‌بینی موقعیت سازه نیاز به در معرض دید بودن اعضای سازه دارند [۳]. اما روش‌های کلی جایگزین مناسبی برای روش‌های موضعی می‌باشند تا به محدودیت‌های آنان غلبه کنند. ایده اصلی این روش‌ها آن است که هر گونه تغییری در مشخصات سازه مانند سختی و میرایی، منجر به تغییر در پارامترهای مودال سازه می‌شود. از این رو در طی سال‌های اخیر از تغییر پارامترهای مودال و ترکیب آن‌ها، روش‌های متنوعی برای تشخیص خرابی پیشنهاد گردیده است.

ویرا^۵ و همکاران با آزمایش بر روی یک سکوی دریایی مدل شده و ایجاد خرابی در آن، فرکانس‌های طبیعی مدل را با استفاده از تحریک اتفاقی بدست آوردند و متوجه شدند که در اثر خرابی، کاهش ۰ تا ۳۵ درصدی در سه فرکانس طبیعی اول ایجاد می‌شود. آن‌ها در مطالعه خود ارزیابی عملکرد برخی روش‌های تشخیص خرابی را با استفاده از بردارهای ویژه بر روی مدل هیدروالاستیک کوچک مقیاس از سکوی دریایی ثابت که با تئوری مشابه طراحی و ساخته شده بود را انجام دادند [۴].

سوق‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۵ تشخیص ترک‌های سطحی در قاب را با توجه به تغییر در فرکانس طبیعی انجام دادند. آن‌ها از روش اجزای محدود برای محاسبه فرکانس طبیعی سازه ترک‌دار استفاده کردند، سپس با توجه به اختلاف فرکانس‌های طبیعی در سازه سالم و آسیب‌دیده و با انجام عمل حل معکوس، محل و عمق خرابی را تعیین کردند [۵].

فیاد و عبدالرزاق^۶ یک تست ارتعاشی برای تشخیص خرابی تکیه‌گاه‌های باربر الاستیک در شاهتیرهای پل بتن مسلح با

- 1 Ultrasonic Test
- 2 Eddy Current Method
- 3 Particle Magnitized Testing Method
- 4 Radiographic Method
- 5 Viero
- 6 Fayyad and Abdul Razak

7 Yam
8 Li
9 Stubbs
10 Ricels and Kosmatka

۲- تعریف مسأله و مدل‌سازی ریاضی

۱-۲ پارامتری کردن خرابی

مشخصات مودال یک سازه فاقد خرابی با استفاده از معادله مقدار ویژه بیان می‌شود:

$$K\phi_i - \omega_i^2 M\phi_i = 0 \quad (1)$$

که در آن K ماتریس سختی، M ماتریس جرم، i فرکانس طبیعی i -ام سازه و ϕ_i شکل مودی متناظر می‌باشد. حال اگر این سازه آسیب ببیند، مقدار سختی سازه تغییر می‌کند و از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$k_d^e = k^e (1 - d_e) \quad (2)$$

که در آن k_d^e و k^e ماتریس سختی المان e -ام از سازه آسیب‌دیده و سالم می‌باشد. d_e نیز شاخص خرابی المان e -ام از سازه آسیب‌دیده می‌باشد که بصورت یک کمیت اسکالر در بازه $[-1, 0]$ بیان می‌شود.

۲-۲ تعریف تابع هدف

تابع هدف را به گونه‌ای در نظر می‌گیریم که نشان دهنده اختلاف بین مشخصات دینامیکی سازه سالم و آسیب‌دیده باشد. دو تابع هدف بصورت مستقل در نظر گرفته می‌شود که در یکی ورودی‌های تابع هدف، فرکانس‌های طبیعی و در دیگری داده‌های شتاب می‌باشد.

۱-۲-۲ تابع هدف با داده‌های مودال

تغییر در مشخصات سازه را می‌توان به عنوان یک عامل محرک برای استفاده از روش مودال برای شناسایی خرابی در نظر گرفت. به منظور استفاده از داده‌های مودال سازه، تابع هدف مبتنی بر داده‌های مودال در نظر گرفته می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_1 = \sum_{i=1}^N \frac{|\omega_{m,i} - \omega_{c,i}|}{|\omega_{m,i}|} \quad (3)$$

که در آن $\omega_{m,i}$ فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده i -ام، $\omega_{c,i}$ فرکانس طبیعی محاسباتی i -ام سازه و N تعداد درجات آزادی می‌باشد. تغییرات فرکانس‌های طبیعی بی بعد شده‌اند تا نمایش

روش‌های ذکر شده تشخیص خرابی معمولاً یک تابع هدف را که بصورت اختلاف بین داده‌های مودال اندازه‌گیری شده از تست‌های مودال و محاسباتی از مدل‌های عددی تعریف می‌شود را بهینه می‌کنند و به کمک آن مقادیر خرابی را تخمین می‌زنند. برای مثال ساهو و مایتی^۱ از یک الگوریتم ژنتیک عصبی^۲ برای ارزیابی خرابی بر اساس این حقیقت که خرابی تأثیر قابل توجهی بر روی رفتار استاتیکی سازه دارد استفاده کردند [۱۶]. همچنین دینگ^۳ و همکاران از الگوریتم رقابت استعماری^۴ و روش بردار نیروی باقیمانده^۵ برای تخمین شدت خرابی در سازه استفاده کردند [۱۷].

تقریباً در تمامی روش‌های ذکر شده، به منظور تشخیص خرابی از داده‌های مودال سیستم به عنوان متغیرهای تابع هدف استفاده می‌شد که با استفاده از یک سری روش‌های ریاضیاتی و بهینه‌یابی، مکان و شدت خرابی بدست می‌آمد. اما در بعضی موارد بخصوص در سازه‌های با درجات آزادی بالا، محاسبه داده‌های مودال سیستم در مودهای بالا به علت نیاز به تجهیزات پیشرفته و دانش بالا، امری مشکل و در بعضی موارد غیرممکن است. از این رو در این مقاله علاوه بر داده‌های مودال، به دنبال استفاده از پاسخ دینامیکی سازه در تابع هدف مستقل می‌باشیم که بدست آوردن آن به مراتب راحت‌تر از تعیین فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی می‌باشد و حتی می‌توان با استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند مجهز به سنسور شتاب‌سنج نیز اندازه‌گیری کرد. همچنین به منظور بهبود سرعت همگرایی و دقت در تشخیص خرابی‌ها، الگوریتم بهینه‌یابی پیشنهادی GWO^۶ (بهینه‌سازی گرگ خاکستری) با استفاده از ویژگی‌های الگوریتم PSO^۷ (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) بهبود یافته و نتایج حاصل از آن با نتایج بدست آمده از الگوریتم GA^۸ و PSO مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دارای عملکردی قابل قبول در مقایسه با سایر روش‌های مطالعه شده می‌باشد.

- 1 Sahoo and Maity
- 2 Hybrid Neuro-Genetic Algorithm
- 3 Ding
- 4 Imperialist Competitive Algorithm
- 5 Residual Force Vector
- 6 Grey Wolf Optimization
- 7 Particle Swarm Optimization
- 8 Genetic Algorithm

یک موقعیت مکانی می‌باشد و متناسب با آن موقعیت مکانی یک مقدار تابع هدف دارد که به آن شایستگی ذره نیز می‌گویند. هرچه یک ذره در فضای جستجو به هدف (غذا در مدل حرکت پرندگان) نزدیک‌تر باشد، شایستگی بیشتری را دارا می‌باشد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت می‌باشد که نشان دهنده جهت حرکت ذره می‌باشد. ذرات بصورت نقاطی در فضای جستجوی D - بعدی در نظر گرفته می‌شوند. موقعیت i - امین ذره بصورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}] \quad (5)$$

در نتیجه جمعیت N راه حل بصورت زیر در می‌آید:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (6)$$

در جستجو برای یافتن بهینه‌ترین جواب، ذرات به طور مرتب موقعیت‌شان را با استفاده از رابطه (۷) بروزرسانی می‌کنند.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

که t و $t+1$ نشان دهنده دو گام متوالی از الگوریتم و بردار v_i نشان دهنده مولفه‌های سرعت i - امین ذره می‌باشد. سرعت i - امین ذره در هر نسل نیز بصورت زیر بدست می‌آید:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + r_1c_1(p_i(t) - x_i(t)) + r_2c_2(p_g(t) - x_i(t)) \quad (8)$$

که P_i بهترین تجربه شخصی ذره و P_g بهترین تجربه جمعی نامیده می‌شود. ضریب w ثابت اینرسی می‌باشد که نشان دهنده تمایل اجسام برای حفظ جهت حرکت اولیه می‌باشد. مقدار آن نیز در مقالات مختلف بصورت متفاوتی در نظر گرفته می‌شود، اما مقدار حداقل و حداکثر آن همواره بازه‌ای بین صفر تا یک را دارا می‌باشد. این ضریب از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T} \times t \quad (9)$$

بهتری از تغییرات نسبی پاسخ داشته باشیم. از سه فرکانس اول سازه در این تابع هدف استفاده شده است.

۲-۲-۲ تابع هدف با داده‌های شتاب

در این حالت، با آنکه می‌توان شتاب تمامی طبقات ناشی از اعمال نیروی زلزله را محاسبه کرد، ولی فرض می‌کنیم شتاب‌سنج در پشت بام قرار دارد و فقط شتاب طبقه آخر را داریم. تابع هدف متناظر با آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_2 = \frac{\int_{t=0}^T |a_m - a_c| dt}{\int_{t=0}^T |a_m| dt} \quad (4)$$

که در آن a_m شتاب اندازه‌گیری شده پشت بام، a_c شتاب محاسباتی پشت بام و T مدت زمان اعمال نیروی زلزله می‌باشد. در این حالت نیز تغییرات شتاب‌ها نیز بی بعد شده‌اند.

با توجه به توابع هدف ذکر شده در بالا، فضای حل بصورت فضایی از شاخص‌های خرابی متناظر با هر المان در نظر گرفته شده است و هدف مسأله، سوق دادن شاخص خرابی هر المان برای انطباق با شاخص خرابی صحیح از مدل عددی است که یک شرایط خاص خرابی را ارائه می‌دهد.

۳- الگوریتم‌های بهینه‌یابی

الگوریتم پیشنهادی GW-PSO، بهبود یافته الگوریتم GWO با استفاده از الگوریتم PSO می‌باشد. به همین منظور در ابتدای این بخش خلاصه‌ای از PSO و GWO آورده شده و در انتهای این بخش هم الگوریتم ترکیبی توضیح داده می‌شود.

۳-۱- الگوریتم ازدحام ذرات^۱

این الگوریتم از رفتار اجتماعی پرندگان در حین جستجوی غذا برای هدایت مجموعه پرندگان به منطقه با جواب‌های مطلوب در فضای جستجو استفاده می‌کند [۱۸]. به هر راه حل یک ذره گفته می‌شود که در اینجا همان پرندگان می‌باشند. هر ذره در فضای جستجو دارای

می‌شود. گرگ‌های امگا نیز از این سه گرگ تبعیت می‌کنند. مدل‌سازی ریاضی رفتار حلقه زدن دور طعمه (محاصره) با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) انجام می‌شود:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (11)$$

که t نشان دهنده تکرار فعلی، A و C بردارهای ضرایب، X_p موقعیت طعمه و X نشان دهنده‌ی بردار موقعیت گرگ می‌باشد. بردارهای A و C بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r}_1 - a \quad (12)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (13)$$

که مولفه a بصورت خطی از دو تا صفر در طی تکرارهای متوالی کاهش می‌یابد. r_1 و r_2 نیز بردارهای تصادفی بین $[0, 1]$ می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی ریاضیاتی رفتار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود که آلفا (بهترین کاندید جواب)، بتا و دلتا دانش بهتری در خصوص موقعیت بالقوه طعمه دارند. بنابراین سه جواب بهتر اول را ذخیره و موقعیت دیگر عوامل جستجو را با توجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو بروز می‌کنیم:

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \vec{D}_\beta \quad (14)$$

$$= \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right|$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (15)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (16)$$

با توجه به روابط بالا آلفا، بتا و دلتا موقعیت طعمه را تخمین می‌زنند و مابقی گرگ‌ها موقعیت‌شان را اطراف طعمه بروز می‌کنند.

که در آن W_{\min} و W_{\max} به ترتیب وزن اولیه و نهایی و T حداکثر تعداد نسل و t شماره هر تکرار می‌باشد.

ثابت‌های شتاب C_1 و C_2 نیز به ترتیب ضرایب یادگیری شخصی و اجتماعی نامیده می‌شوند. ضرایب r_1 و r_2 نیز اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ می‌باشند.

مراحل الگوریتم PSO بصورت زیر می‌باشد:

(۱) ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن با استفاده از تابع هدف تعیین

شده

(۲) تعیین بهترین تجربه‌های شخصی و جمعی

(۳) بروزرسانی سرعت و موقعیت ارزیابی پاسخ‌های جدید

(۴) در صورت برآورده نشدن شرایط توقف، به مرحله ۲ باز

می‌گردیم.

(۵) پایان

۳-۲- الگوریتم گرگ خاکستری^۱

الگوریتم گرگ خاکستری الهام گرفته از زندگی گروهی گرگ‌ها می‌باشد [۱۹]. آن‌ها دارای یک ساختار سلسله مراتبی می‌باشند که در این ساختار از بالا به پایین حاکمیت کاهش می‌یابد. رهبر گروه آلفا می‌باشد و گرگ‌های دیگر موظف به اطاعت از او می‌باشند. دومین سطح قدرت در ساختار سلسله مراتبی، بتا نام دارد. بتاها گرگ‌های مطیع هستند که به گرگ آلفا در تصمیم‌گیری کمک می‌کنند. رده بعدی از ساختار قدرت مربوط به گرگ‌های دلتا می‌باشد. این گرگ‌ها از دستورات آلفا و بتا تبعیت می‌کنند و به گرگ‌های سطح پایین‌تر دستور می‌دهند. پایین‌ترین رده گرگ‌ها نیز گرگ‌های امگا می‌باشند. گرگ‌های امگا نقش طعمه را بازی می‌کنند و از سایر گرگ‌های گروه تبعیت می‌کنند.

۳-۲-۱- مدل ریاضی

به منظور مدل‌سازی ریاضی سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها زمان طراحی GWO، مناسب‌ترین گزینه را به عنوان آلفا در نظر می‌گیریم. متعاقباً دومین و سومین جواب بهتر بتا و دلتا نامیده می‌شوند. بقیه جواب‌های کاندید فرض می‌شود که امگا باشند. در الگوریتم بهینه‌یابی، شکار بوسيله‌ی گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا انجام

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم GA

Table 1. Parameters of Genetic Algorithm (GA)

| ضرب تقاطع (P_c) | ضرب جهش (P_m) | نرخ تأثیر جهش (m_{II}) | فشار انتخاب (S_p) |
|---------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------|
| ۰/۸ | ۰/۰۲ | ۰/۵ | ۷ |

۳-۳- الگوریتم ترکیبی

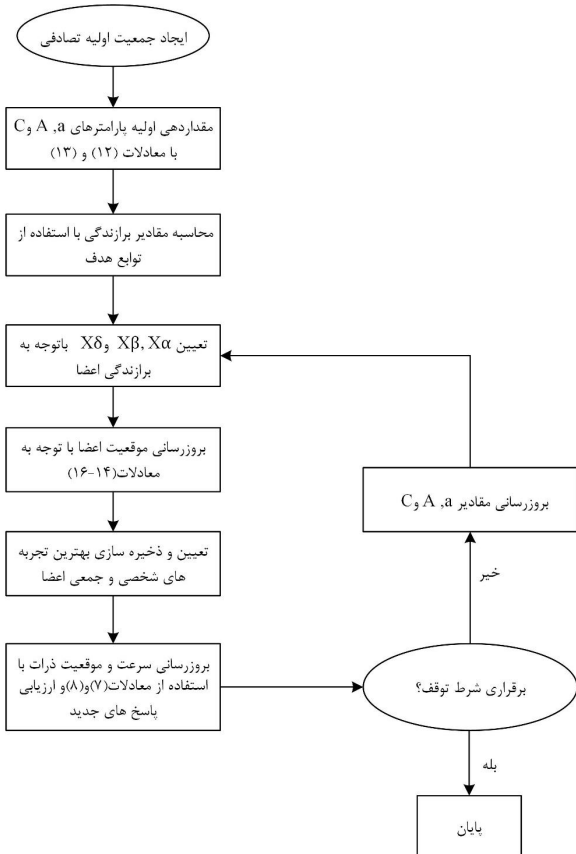
الگوریتم پیشنهادی یک الگوریتم ترکیبی می‌باشد که ترکیبی از الگوریتم‌های گرگ خاکستری و ازدحام ذرات می‌باشد. این الگوریتم‌ها در طول هم و بصورت سری استفاده شده‌اند. نحوه عملکرد الگوریتم ترکیبی بدین صورت است که در ابتدا یک جمعیت تصادفی اولیه در فضای جستجو ایجاد می‌کند. با استفاده از تابع هدف، برازندگی اعضا تعیین شده و گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا تعیین می‌شود. سپس موقعیت سایر اعضا با توجه به موقعیت این سه گرگ بروزرسانی می‌شود. سپس این موقعیت بروزرسانی شده به عنوان یک جواب اولیه به الگوریتم ازدحام ذرات داده شده و با استفاده از برازندگی اعضا و ویژگی‌های الگوریتم PSO بهترین تجربه شخصی و گروهی اعضا تعیین شده و مکان و سرعت آن‌ها بروزرسانی می‌شود و این فرایند در هر گام تکرار می‌شود. مراحل الگوریتم در شکل ۱ آمده است.

۴-مثال‌های عددی

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی برای شناسایی شدت خرابی سازه‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سازه برشی مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ تنظیم شده و سازه خرپایی نیز از مرجع [۲۰] گرفته شده است. سازه‌های مورد مطالعه شامل سازه برشی ۱۰ طبقه و خرپای دو بعدی ۱۰ عضوی می‌باشد. این سازه‌ها برای بررسی عملکرد روش‌های پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن‌ها در دو حالت مودال و پاسخ دینامیکی با هم مقایسه می‌شود. همچنین نتایج الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های GA و PSO مقایسه می‌شود. برای تمامی الگوریتم‌ها در سازه برشی تعداد نسل‌ها برابر ۱۰۰ و در سازه خرپایی برابر ۸۰ در نظر گرفته شده است.

همچنین پارامترهای مورد استفاده برای الگوریتم GA در جدول ۱ آمده است.

در الگوریتم PSO نیز پارامتر W دارای رابطه خطی کاهنده می‌باشد که مقدار آن طبق رابطه (۹) از ۱ تا ۰/۱ کاهش می‌یابد. سرعت حداکثر (V_{max}) برابر ۰/۱ حد بالای متغیرها و سرعت حداقل



شکل ۱. مراحل الگوریتم پیشنهادی GW-PS

Fig. 1. Flowchart of the proposed damage detection method (GW-PS)

(V_{min}) نیز برابر ۰/۱ حد پایین متغیرها در نظر گرفته شده است. مقادیر شتاب C_1 و C_2 نیز برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در تشخیص خرابی با داده‌های شتاب، از اطلاعات زلزله ال سنترو استفاده شده است.

۴-۱- سازه برشی ۱۰ طبقه

هندسه اولیه سازه در شکل ۲ آمده است. این سازه ۱۰ طبقه بوده و به منظور ساده‌سازی، درجات آزادی طبقات فقط در راستای X در نظر گرفته شده و جرم طبقات نیز بصورت متمرکز در کف طبقات لحاظ شده است. پلان سازه در هر جهت دارای ۵ دهانه بوده که

جدول ۲. مشخصات مقاطع سازه برشی ۱۰ طبقه

Table 2. Section properties for 10-story shear building

| شماره طبقات | جرم طبقات (*10 ⁵ kg) | ارتفاع طبقات (m) | مقاطع ستونها (IPB) | مقاطع تیرها (IPE) |
|-------------|---------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| طبقه اول | ۱۴ | ۳/۶۵ | ۴۵۰ | ۴۰۰ |
| طبقه دوم | ۱۲/۶ | ۳ | ۳۶۰ | ۳۲۰ |
| طبقه سوم | ۱۱/۴ | ۳ | ۳۴۰ | ۳۰ |
| طبقه چهارم | ۹/۴ | ۳ | ۳۲۰ | ۲۷۰ |
| طبقه پنجم | ۸/۱ | ۳ | ۳۲۰ | ۲۴۰ |
| طبقه ششم | ۷/۶ | ۳ | ۳۰۰ | ۲۲۰ |
| طبقه هفتم | ۷/۶ | ۳ | ۲۸۰ | ۲۰۰ |
| طبقه هشتم | ۵/۶ | ۳ | ۲۶۰ | ۲۰۰ |
| طبقه نهم | ۵/۱ | ۳ | ۲۴۰ | ۱۸۰ |
| طبقه دهم | ۴/۵ | ۳ | ۲۰۰ | ۱۶۰ |

دهانه‌ها ۶ متری می‌باشند.

مشخصات اساسی سازه در جدول ۲ آورده شده است. این مقاطع با استفاده از طراحی سازه در نرم‌افزار Etabs بدست آمده است. مدول الاستیسیته فولاد به کار برده شده برابر ۲۵۵ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۱- سناریوی خرابی

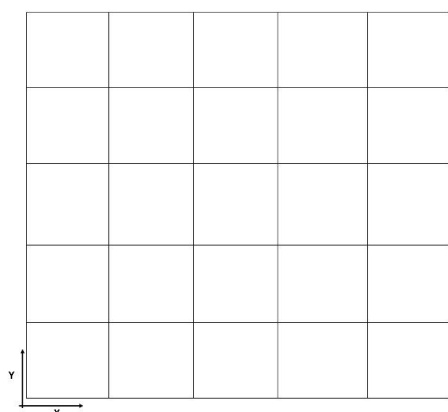
سناریوی خرابی بدین صورت است که خرابی در طبقات چهارم، ششم، هفتم و هشتم مفروض شده است که مقادیر آن در جدول ۳ آمده است. خرابی‌ها بصورت کاهش در مدول یانگ اعضای موردنظر در نظر گرفته می‌شوند.

فرآیند تشخیص مقدار خرابی در دو حالت انجام می‌گیرد؛ در حالت اول از داده‌های مودال به عنوان ورودی‌های تابع هدف برای تشخیص

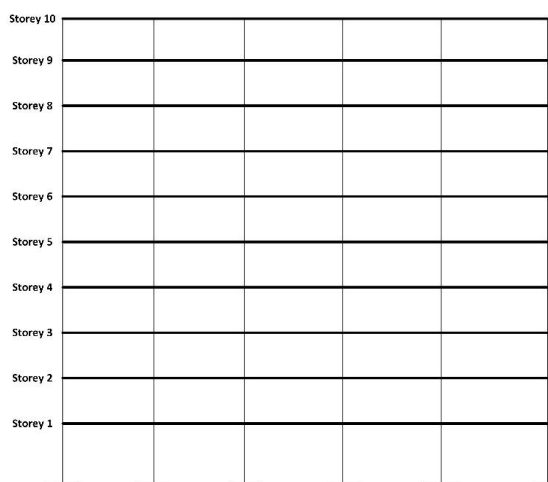
خرابی استفاده می‌شود که در این حالت از رابطه (۳) به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود و در حالت دوم هم از داده‌های شتاب بدست آمده (از طبقه آخر) برای این منظور استفاده می‌شود که رابطه نظیر آن، رابطه (۴) می‌باشد. در هر حالت هم عملکرد الگوریتم‌های GA و PSO با الگوریتم پیشنهادی GW-PS مقایسه می‌شود.

نمودار نیمه لگاریتمی بهترین مقادیر تابع هدف برای الگوریتم‌های ذکر شده در شکل ۳ آمده است. همچنین نمودارهای همگرایی شاخص خرابی طبقات آسیب دیده در اشکال ۴ تا ۷ آمده است.

باتوجه به شکل (۳-الف) در حالتی که از داده‌های مودال استفاده می‌شود برازندگی نهایی بدست آمده از الگوریتم GW-PS از سایر الگوریتم‌ها بهتر است. همچنین با توجه به شکل (۳-ب) هنگامی که از داده‌های شتاب سازه استفاده می‌شود نیز الگوریتم GW-PS مقدار برازندگی نهایی را نسبت به سایر الگوریتم‌ها بدست می



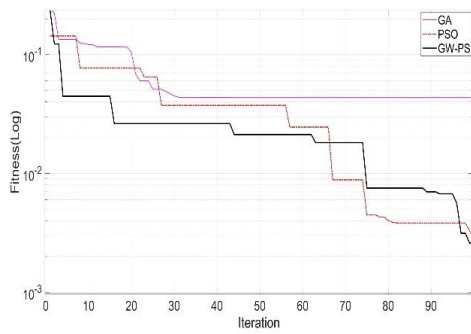
(ب)



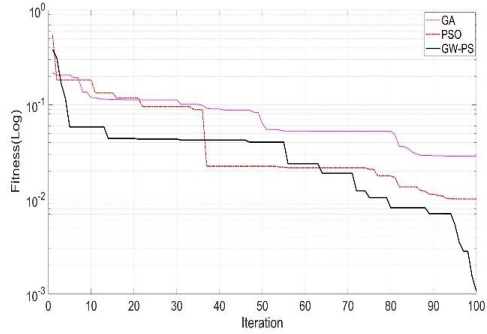
(الف)

شکل ۲. سازه برشی ۱۰ طبقه (الف) نمای سازه (ب) پلان سازه

Fig. 2. 10-story shear building: a) Elevation view. B) Plan view



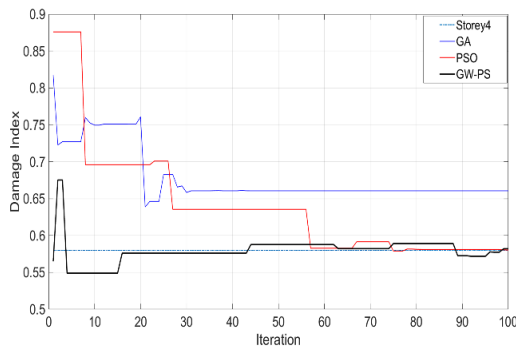
(ب)



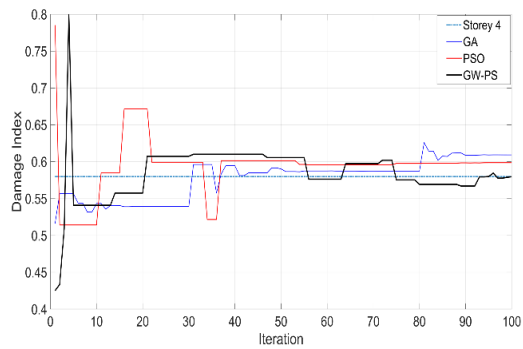
(الف)

شکل ۳. نمودار نیمه لگاریتمی مقادیر تابع هدف سازه برشی ۱۰ طبقه (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 3. History of convergence for fitness values in 10-story shear building using: a) Modal data. b) Measured acceleration data.



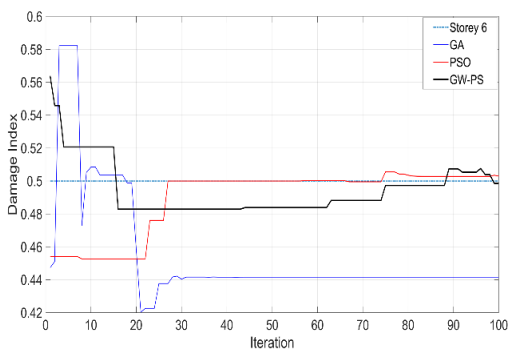
(ب)



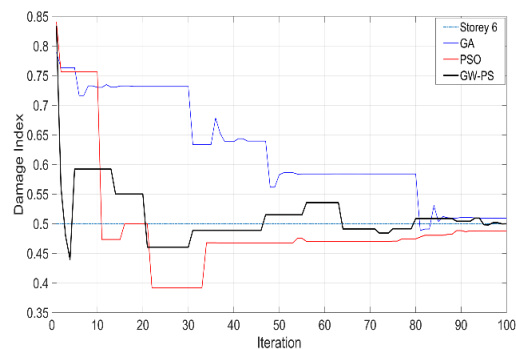
(الف)

شکل ۴. نمودار همگرایی شاخص خرابی طبقه چهارم سازه برشی ۱۰ طبقه (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 4. The estimated damage index in 4th floor calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.



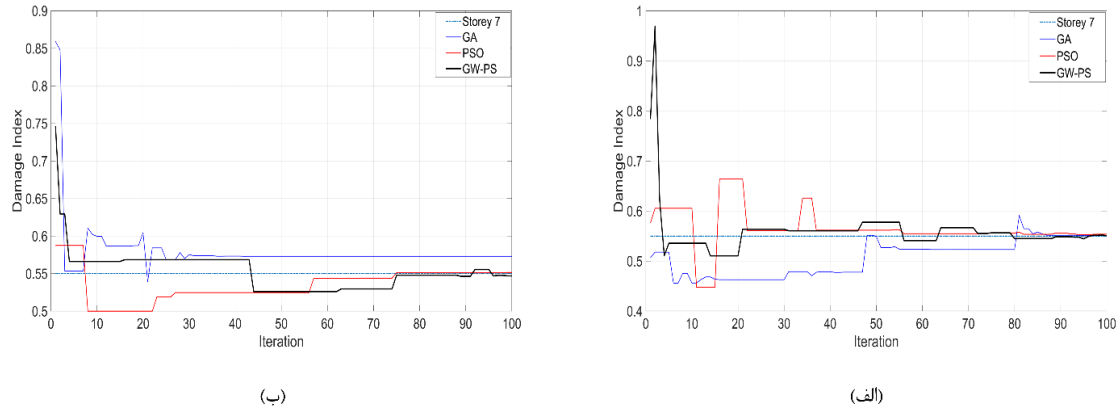
(ب)



(الف)

شکل ۵. نمودار همگرایی شاخص خرابی طبقه ششم سازه برشی ۱۰ طبقه (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 5. The estimated damage index in 6th floor calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.



شکل ۶. نمودار همگرایی شاخص خرابی طبقه هفتم سازه برشی ۱۰ طبقه (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 6. The estimated damage index in 7th floor calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.

است، مقدار میانگین و انحراف معیار برازندگی تابع هدف به ازای ۲۰ مرتبه اجرای مستقل الگوریتم‌ها برای دو حالت استفاده از داده‌های و شتاب به ترتیب در جداول (۵-الف) و (۵-ب) آمده است. با توجه به جدول (۵-الف) میانگین مقادیر تابع هدف در الگوریتم GW-PS نسبت به GA کمتر بوده و با اختلاف اندکی از PSO بیشتر است که نشانگر عملکرد خوب آن در این حالت است. همین عملکرد در جدول (۵-ب) و به هنگام استفاده از داده‌های شتاب نیز قابل مشاهده است.

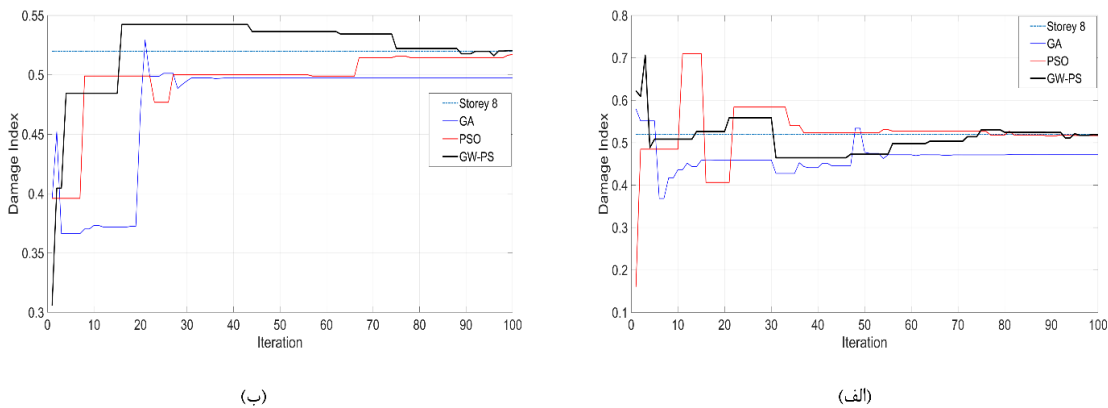
۴-۲- سازه خرابی ۱۰ عضوی

مثال دوم یک سازه خرابی می‌باشد که در شکل ۸ آمده است [۲۰]. تعداد کل اعضا برابر ۱۰ و تعداد کل گره‌ها برابر ۶ می‌باشد. مدول الاستیسیته مصالح برابر $10^{10} \times 6/89$ پاسکال و وزن مخصوص

دهد.

با توجه به شکل‌های ۴ تا ۷، در حالتی که از داده‌های مودال به عنوان ورودی تابع هدف (رابطه ۳)) استفاده کنیم، در بعضی موارد الگوریتم پیشنهادی GW-PS تقریب اولیه ضعیف‌تری برای حدس مقادیر خرابی نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد، اما در طی تکرارهای متوالی مقدار آن بهبود می‌یابد، به گونه‌ای که در نهایت به مقدار واقعی خرابی نزدیک‌تر است. همچنین هنگامی که از داده‌های شتاب برای تشخیص خرابی (رابطه ۴)) استفاده کنیم نیز همین شرایط برقرار است و مقدار خرابی را با دقت خوبی تخمین می‌زند. نتایج تشخیص خرابی برای حالت استفاده از داده‌های مودال و شتاب به ترتیب در جداول (۴-الف) و (۴-ب) آمده است.

برای مقایسه عادلانه روش‌ها و نیز رفع این ابهام که این نتایج برای یک مرتبه اجرای الگوریتم بوده و نتایج بصورت تصادفی بدست آمده



شکل ۷. نمودار همگرایی شاخص خرابی طبقه هشتم سازه برشی ۱۰ طبقه (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 7. The estimated damage index in 8th floor calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.

جدول ۳. مقادیر خرابی مفروض طبقات سازه برشی ۱۰ طبقه

Table 3. Real values of damage indices in 10-story shear building

| شماره طبقات | چهارم (d4) | ششم (d6) | هفتم (d7) | هشتم (d8) |
|------------------------------|------------|----------|-----------|-----------|
| کاهش مدول الاستیسیته (خرابی) | ۰/۵۸ | ۰/۵ | ۰/۵۵ | ۰/۵۲ |

جدول ۴-الف. مقادیر شاخص خرابی بدست آمده از سازه برشی ۱۰ طبقه با استفاده از داده‌های مودال

Table 4. a) Damage indices for 10-story shear building calculated from modal data

| | طبقه چهارم | خطا (%) | طبقه ششم | خطا (%) | طبقه هفتم | خطا (%) | طبقه هشتم | خطا (%) |
|-------------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| مقدار خرابی | ۰/۵۸ | ۰ | ۰/۵ | ۰ | ۰/۵۵ | ۰ | ۰/۵۲ | ۰ |
| GA | ۰/۶۰۹۳ | ۷/۳۹۵ | ۰/۵۰۹۶ | ۲/۴۲ | ۰/۵۵۱۳ | ۰/۳۳۷۵ | ۰/۴۷۱۸ | ۱۲/۰۴۵ |
| PSO | ۰/۵۹۸۷ | ۴/۶۸ | ۰/۴۸۸۱ | ۲/۹۷۵ | ۰/۵۵۳۶ | ۰/۹۰۵ | ۰/۵۱۶۹ | ۰/۷۵۷۵ |
| GW-PS | ۰/۵۷۹۷ | ۰/۰۶ | ۰/۵۰۰۱ | ۰/۰۲۷۵ | ۰/۵۵۰۵ | ۰/۱۴ | ۰/۵۱۸۸ | ۰/۳ |

جدول ۴-ب: مقادیر شاخص خرابی بدست آمده از سازه برشی ۱۰ طبقه با استفاده از داده‌های شتاب

Table 4. b) Damage indices for 10-story shear building calculated from measured acceleration data

| | طبقه چهارم | خطا (%) | طبقه ششم | خطا (%) | طبقه هفتم | خطا (%) | طبقه هشتم | خطا (%) |
|-------------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| مقدار خرابی | ۰/۵۸ | ۰ | ۰/۵ | ۰ | ۰/۵۵ | ۰ | ۰/۵۲ | ۰ |
| GA | ۰/۶۶۰۶ | ۲۰/۱۵۵ | ۰/۴۴۱۶ | ۱۴/۵۹۷۵ | ۰/۵۷۳۰ | ۵/۷۶ | ۰/۴۹۷۲ | ۵/۶۷۷۵ |
| PSO | ۰/۵۸۰۲ | ۰/۰۶۵ | ۰/۵۰۲۹ | ۰/۷۴۲۵ | ۰/۵۵۱۵ | ۰/۳۸۷۵ | ۰/۵۱۷۱ | ۰/۷۱۵ |
| GW-PS | ۰/۵۸۲۰ | ۰/۵۱ | ۰/۴۹۸۶۱ | ۰/۳۴۷۵ | ۰/۵۴۶۹ | ۰/۷۵۵ | ۰/۵۲۰۴ | ۰/۰۸۵ |

جدول ۵-الف: مقادیر آماری برازندگی تابع هدف با استفاده از داده‌های مودال

Table 5. a) Statistical properties of the optimal solution found by modal data in the shear building problem using the proposed method (GW-PS) in comparison with GA and PSO

| | میانگین برازندگی تابع هدف | انحراف معیار |
|-------|---------------------------|--------------|
| GA | ۰/۰۳۲۸۳۲ | ۰/۰۱۶۹۱۶ |
| PSO | ۰/۰۰۱۱۶۲ | ۰/۰۰۰۸۲۱ |
| GW-PS | ۰/۰۰۱۳۹۵ | ۰/۰۰۰۴۵۸ |

جدول ۵-ب: مقادیر آماری برازندگی تابع هدف با استفاده از داده‌های شتاب

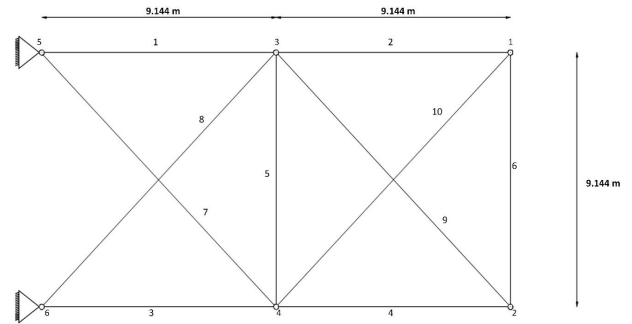
Table 5. b) Statistical properties of the optimal solution found by measured acceleration data in the shear building problem using the proposed method (GW-PS) in comparison with GA and PSO

| | میانگین برازندگی تابع هدف | انحراف معیار |
|-------|---------------------------|--------------|
| GA | ۰/۰۹۶۹۱۹ | ۰/۲۸۳۰۴ |
| PSO | ۰/۰۰۱۰۹۲ | ۰/۰۰۰۷۴۶ |
| GW-PS | ۰/۰۰۱۱۳۸ | ۰/۰۰۰۶۰۸ |

جدول ۶. سطح مقطع اعضای خرابی ۱۰ عضوی

Table 6. Section properties for the two-dimensional truss

| شماره المان | سطح مقطع اعضا (cm ²) |
|-------------|----------------------------------|
| ۱ | ۳۵/۹۴۴ |
| ۲ | ۱۵/۵۳ |
| ۳ | ۳۵/۲۸۵ |
| ۴ | ۱۵/۳۸۵ |
| ۵ | ۰/۶۴۸ |
| ۶ | ۴/۵۸۳ |
| ۷ | ۲۳/۶۱ |
| ۸ | ۲۳/۵۹۹ |
| ۹ | ۱۳/۱۳۵ |
| ۱۰ | ۱۲/۳۵۷ |



شکل ۸. خرابی دوبعدی ۱۰ عضوی

Fig. 8. Two-dimensional truss with 10 elements

آن‌ها برابر ۲۷۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب و طول هر کدام از اعضای مستقیم برابر ۹/۱۴۴ متر می‌باشد. سطح مقطع اعضا در جدول ۶ آمده است [۲۱].

نمودار نیمه لگاریتمی مقادیر تابع هدف برای الگوریتم‌های ذکر شده در حالت استفاده از داده‌های مودال در شکل (۹-الف) و در حالت استفاده از داده‌های شتاب در شکل (۹-ب) آمده است.

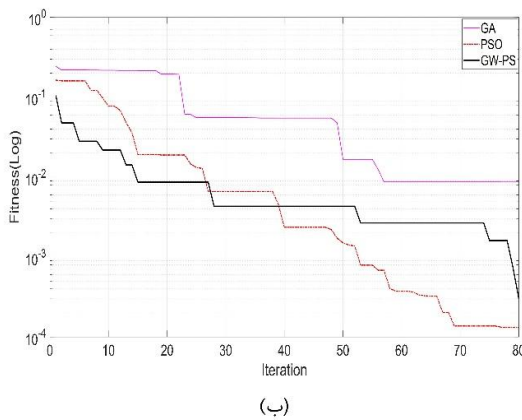
با توجه به شکل ۹ ملاحظه می‌شود که در حالت استفاده از داده‌های مودال، مقدار برازندگی نهایی الگوریتم پیشنهادی نسبت به GA بهتر بوده ولی نسبت به PSO اندکی ضعیف‌تر می‌باشد. همچنین در حالت استفاده از داده‌های شتاب نیز برازندگی نسبت به GA بهتر بوده، اما نسبت به PSO اندکی ضعیف‌تر می‌باشد.

همچنین نمودارهای همگرایی شاخص خرابی المان‌های آسیب دیده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ آمده است. با توجه به این شکل‌ها، در حالتی که از داده‌های مودال استفاده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی با تقریب اولیه ضعیف‌تری شروع به تخمین مقدار شاخص خرابی

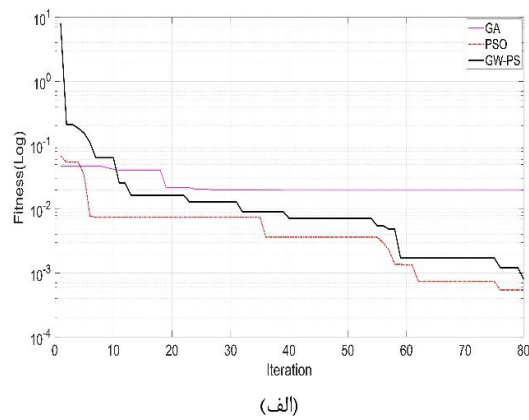
۴-۲-۱- سناریوی خرابی

نمونه خرابی فرض می‌کند که المان‌های اول، هفتم و هشتم دارای ۵۵٪، ۵۱٪ و ۴۰٪ کاهش مدول یانگ می‌باشند. این مقادیر خرابی در جدول ۷ آمده است.

در این مثال نیز همانند مثال قبلی فرآیند تشخیص مقدار خرابی در دو حالت انجام می‌گیرد؛ در حالت اول از داده‌های مودال به عنوان ورودی‌های تابع هدف برای تشخیص خرابی استفاده می‌شود که در این حالت از رابطه (۳) به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود و در حالت دوم هم از داده‌های شتاب بدست آمده (از گره اول خرابی) برای این منظور استفاده می‌شود که رابطه نظیر آن، رابطه (۴) می‌باشد. در هر حالت هم عملکرد الگوریتم‌های GA و PSO با الگوریتم پیشنهادی GW-PS مقایسه می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۹. نمودار نیمه لگاریتمی مقادیر تابع هدف خرابی دو بعدی ۱۰ عضوی (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 9. History of convergence for fitness values in the two-dimensional truss using: a) Modal data. b) Measured acceleration data.

جدول ۷. مقادیر خرابی مفروض برای خرابی دوبعدی ۱۰ عضوی

Table 7. Real values of damage indices in the two-dimensional truss

| شماره المان‌ها | اول (d_1) | هفتم (d_7) | هشتم (d_8) |
|------------------------------|---------------|----------------|----------------|
| کاهش مدول الاستیسیته (خرابی) | ۰/۵۵ | ۰/۵۱ | ۰/۴ |

جدول ۸-الف: مقادیر شاخص خرابی بدست آمده برای خرابی ۱۰ عضوی با استفاده از داده‌های مودال

Table 8. a) Damage indices for the two-dimensional truss calculated from modal data

| | عضو اول | خطا(%) | عضو هفتم | خطا(%) | عضو هشتم | خطا(%) |
|-------------|---------|--------|----------|--------|----------|--------|
| مقدار خرابی | ۰/۵۵ | ۰ | ۰/۵۱ | ۰ | ۰/۴ | ۰ |
| GA | ۰/۵۱۲۳ | ۹/۴۱ | ۰/۵۳۸۲ | ۷/۰۵ | ۰/۴۲۴۳ | ۶/۰۸۲۵ |
| PSO | ۰/۵۴۸۵ | ۰/۳۵۲۵ | ۰/۵۰۹۶ | ۰/۰۸۵ | ۰/۴۰۱۰۲ | ۰/۲۵۵ |
| GW-PS | ۰/۵۵۱۷ | ۰/۴۳۲۵ | ۰/۵۰۹۲ | ۰/۱۹۵ | ۰/۳۹۸۸ | ۰/۲۸۷۵ |

جدول ۸-ب: مقادیر شاخص خرابی بدست آمده برای خرابی ۱۰ عضوی با استفاده از داده‌های مودال

Table 8. b) Damage indices for the two-dimensional truss calculated from measured acceleration data

| | عضو اول | خطا(%) | عضو هفتم | خطا(%) | عضو هشتم | خطا(%) |
|-------------|---------|--------|----------|--------|----------|--------|
| مقدار خرابی | ۰/۵۵ | ۰ | ۰/۵۱ | ۰ | ۰/۴ | ۰ |
| GA | ۰/۵۲۷۱ | ۵/۷۱۵ | ۰/۵۰۵۵ | ۱/۱۲۵ | ۰/۴۱۶۸ | ۴/۲۱۵ |
| PSO | ۰/۵۴۹۸ | ۰/۰۳۲۵ | ۰/۵۰۹۸ | ۰/۰۲۷۵ | ۰/۴۰۰۲ | ۰/۰۵۷۵ |
| GW-PS | ۰/۵۵۰۷ | ۰/۱۸۲۵ | ۰/۵۰۹۷ | ۰/۰۶۷۵ | ۰/۳۹۹۶ | ۰/۱ |

جدول ۹-الف: مقادیر آماری برازندگی تابع هدف با استفاده از داده‌های مودال

Table 9. a) Statistical properties of the optimal solution found by modal data in the truss problem using the proposed method (GW-PS) in comparison with GA and PSO

| | میانگین برازندگی تابع هدف | انحراف معیار |
|-------|---------------------------|--------------|
| GA | ۰/۰۳۴۹۸۲ | ۰/۰۱۰۸۳۴ |
| PSO | ۰/۰۰۰۴۸۵ | ۰/۰۰۰۴۲۶ |
| GW-PS | ۰/۰۰۰۵۹۰ | ۰/۰۰۰۳۲۹ |

جدول ۹-ب: مقادیر آماری برازندگی تابع هدف با استفاده از داده‌های شتاب

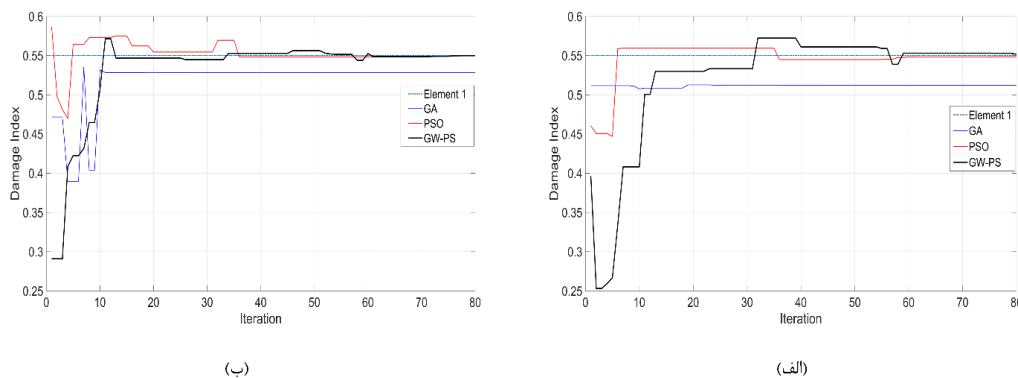
Table 9. b) Statistical properties of the optimal solution found by measured acceleration data in the truss problem using the proposed method (GW-PS) in comparison with GA and PSO

| | میانگین برازندگی تابع هدف | انحراف معیار |
|-------|---------------------------|--------------|
| GA | ۰/۰۶۸۸۶۳ | ۰/۱۵۵۵۴ |
| PSO | ۰/۰۰۰۶۶۸ | ۰/۰۰۰۴۵۵ |
| GW-PS | ۰/۰۰۰۵۵۲ | ۰/۰۰۰۳۲۰ |

جدول ۱۰. مزایا و معایب استفاده از روش داده‌های مودال و شتاب

Table 10. Benefits and draw backs of calculating damage indices using modal data versus measured acceleration

| | مزایا | معایب |
|----------------|--|--|
| داده‌های مودال | ۱- زمان محاسباتی کمتر به دلیل عدم نیاز به حل معادله دینامیکی | ۱- مشکل بودن محاسبه داده‌های مودال سیستم در موده‌های بالا ۲- نیاز به تجهیزات پیشرفته و دانش بالا |
| داده‌های شتاب | ۱- سهولت استخراج داده‌های شتاب سازه و استفاده از آن | ۱- زمان محاسباتی بیشتر نسبت به استفاده از داده‌های مودال به دلیل حل معادلات دینامیکی در هر گام از بهینه‌یابی |



شکل ۱۰. نمودار همگرایی شاخص خرابی المان اول خرابی دوبعدی ۱۰ عضوی (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 10. The estimated damage index for element #1 of the truss calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.

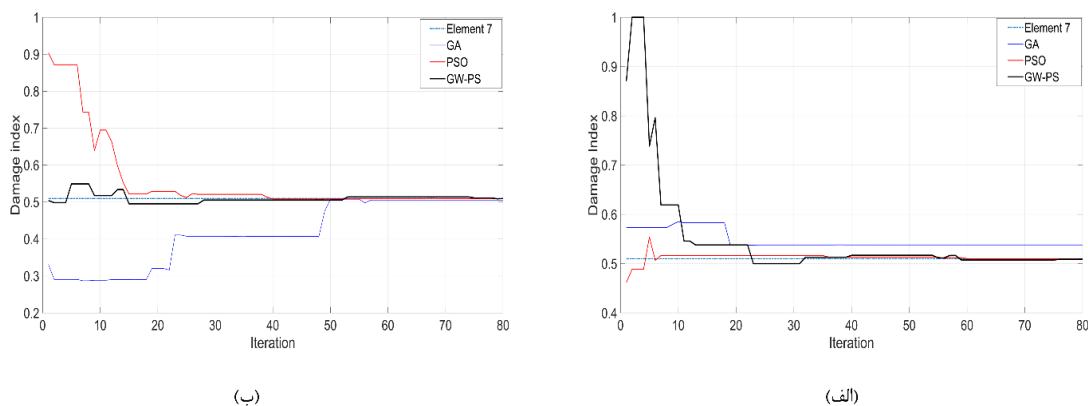
آماری الگوریتم پیشنهادی از سایر الگوریتم‌ها بهتر می‌باشد. همان‌طور که از نتایج مثال‌ها بدست آمد، در حالتی که تابع هدف با استفاده از داده‌های شتاب تعریف می‌شود جواب‌های بدست آمده به مراتب بهتر یا برابر با جواب‌هایی است که از تابع هدف تعریف شده با استفاده از داده‌های مودال بدست آمده است؛ در حالی که بدست آوردن شتاب سازه راحت‌تر و آسان‌تر از داده‌های مودال می‌باشد. در جدول زیر برخی از مزایا و معایب هر یک از دو روش داده‌های مودال و شتاب آورده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند شناسایی میزان خرابی براساس اندازه‌گیری بخش محدودی از مشخصات مودال و مقایسه نتایج بدست آمده از آن با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی سازه در

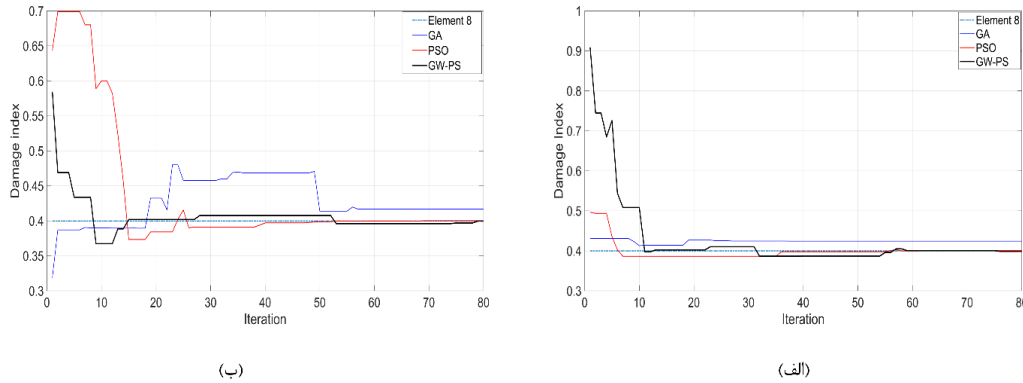
می‌کند، اما در نهایت با دقت خوبی مقدار خرابی را تخمین می‌زند. همچنین برای حالتی که از داده‌های شتاب برای تشخیص خرابی استفاده می‌شود نیز الگوریتم پیشنهادی مقادیر خرابی را با دقت خوبی تخمین می‌زند. نتایج تشخیص خرابی در دو حالت استفاده از داده‌های مودال و شتاب به ترتیب در جداول (۸-الف) و (۸-ب) آمده است. همانند مثال قبلی، مقدار میانگین و انحراف معیار برازندگی تابع هدف به ازای ۱۰ مرتبه اجرای مستقل الگوریتم‌ها برای هر دو حالت استفاده از داده‌های مودال و شتاب به ترتیب در جداول (۹-الف) و (۹-ب) آمده است.

با توجه به جدول (۹-الف) می‌توان دریافت که در حالت استفاده از داده‌های مودال، مقادیر آماری الگوریتم پیشنهادی نسبت به GA بهتر است، اما نسبت به PSO اندکی ضعیف‌تر می‌باشد. همچنین با توجه به جدول (۹-ب) در حالت استفاده از داده‌های شتاب مقادیر



شکل ۱۱. نمودار همگرایی شاخص خرابی المان هفتم خرابی دوبعدی ۱۰ عضوی (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 11. The estimated damage index for element #7 of the truss calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.



شکل ۱۲. نمودار همگرایی شاخص خرابی المان هشتم خرابی دوبعدی ۱۰ عضوی (الف) داده‌های مودال (ب) داده‌های شتاب

Fig. 12. The estimated damage index for element #8 of the truss calculated from: a) Modal data. b) Measured acceleration data.

- [5] N. Souq, S.S. Mousavi, G. Baradaran, Crack detection in frame Structures with regard to changes in natural frequencies by using finite element method and ACO R, *Modares Mechanical Engineering*, 15(8) (2015).
- [6] M.M. Fayyadh, H.A. Razak, Condition assessment of elastic bearing supports using vibration data, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 616-628.
- [7] L. Yam, Y. Li, W. Wong, Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches, *Engineering structures*, 24(11) (2002) 1465-1475.
- [8] Y. Li, L. Cheng, L. Yam, W. Wong, Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach, *Computers & structures*, 80(25) (2002) 1881-1894.
- [9] N. Stubbs, J.-T. Kim, Damage localization in structures without baseline modal parameters, *AIAA journal*, 34(8) (1996) 1644-1649.
- [10] M. Nobahari, S.M. Seyedpoor, An efficient method for structural damage localization based on the concepts of flexibility matrix and strain energy of a structure, *Structural Engineering and Mechanics*, 46(2) (2013) 231-244.
- [11] J. Ricles, J. Kosmatka, Damage detection in elastic structures using vibratory residual forces and weighted sensitivity, *AIAA journal*, 30(9) (1992) 2310-2316.
- [12] R.J. Allemang, D.L. Brown, A correlation coefficient for modal vector analysis, in: *Proceedings of the 1st international modal analysis conference, SEM Orlando, 1982*, pp. 110-116.
- [13] T. Pothisiri, K. Hjelmstad, Structural damage detection and assessment from modal response, *Journal of engineering mechanics*, 129(2) (2003) 135-145.
- [14] J.A. Escobar, J.J. Sosa, R. Gómez, Structural damage

تعداد محدودی از درجات آزادی انجام گرفت. یک الگوریتم ترکیبی با استفاده از الگوریتم‌های PSO و GWO برای بهینه‌یابی تابع هدف و تشخیص خرابی ارائه شد و عملکرد آن با PSO و GA بر روی دو مثال عددی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان از کارایی قابل قبول الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مطرح شده در این مقاله را دارند. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، جواب‌ها در حالت استفاده از داده‌های شتاب دارای جوابی برابر با کیفیت جواب‌های بدست آمده از داده‌های مودال و یا بهتر از آن می‌باشد، با این تفاوت که اندازه‌گیری شتاب سازه راحت‌تر از تعیین فرکانس‌ها یا سایر پارامترهای مودال سازه می‌باشد که همین امر می‌تواند در مطالعات آتی به عنوان پارامتری در تشخیص خرابی مورد استفاده قرار بگیرد.

۶-مراجع

- [1] C. Ghee Koh, L. Ming See, T. Balendra, Damage detection of buildings: numerical and experimental studies, *Journal of structural engineering*, 121(8) (1995) 1155-1160.
- [2] A. Rytter, *Vibrational based inspection of civil engineering structures*, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.
- [3] H. Lam, *Detection of damage location based on sensitivity and experimental modal analysis*, MPh dissertation, Hong Kong Polytech. Univ., Hong Kong, (1994).
- [4] P.F. Viero, N. Roitman, Application of some damage identification methods in offshore platforms, *Marine Structures*, 12(2) (1999) 107-126.

- neural networks, Citeseer, 1995, pp. 1942-1948.
- [19] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis, Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 69 (2014) 46-61.
- [20] A. Kaveh, A. Zolghadr, Truss optimization with natural frequency constraints using a hybridized CSS-BBBC algorithm with trap recognition capability, *Computers & Structures*, 102 (2012) 14-27.
- [21] Kaveh, A. Zolghadr, Democratic PSO for truss layout and size optimization with frequency constraints, *Computers & Structures*, 130 (2014) 10-21.
- detection using the transformation matrix, *Computers & structures*, 83(4-5) (2005) 357-368.
- [15] D. Huynh, J. He, D. Tran, Damage location vector: A non-destructive structural damage detection technique, *Computers & Structures*, 83(28-30) (2005) 2353-2367.
- [16] B. Sahoo, D. Maity, Damage assessment of structures using hybrid neuro-genetic algorithm, *Applied Soft Computing*, 7(1) (2007) 89-104.
- [17] Z. Ding, R. Yao, J. Huang, M. Huang, Z. Lu, Structural damage detection based on residual force vector and imperialist competitive algorithm, *Structural Engineering and Mechanics*, 62(6) (2017) 709-717.
- [18] R. Eberhart, J. Kennedy, Particle swarm optimization, in: *Proceedings of the IEEE international conference on*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Y. Shabani, P. Ghaderi, Damage Detection Based on Modal Parameters and Dynamic Responses using by Enhanced Grey Wolf Optimization, Amirkabir J. Civil Eng., 53(3) (2021) 1009-1024.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16681.6330](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16681.6330)



