مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 237-246

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مقایسه‌ی فرآیند عیب‌یابی با الگوریتم‌های مختلف بهینه‌کننده‌ی جستجو در المان‌های مسطح سه‌بعدی برمبنای مشخصات دینامیکی سازه

محمد مهدی علی‌نیا*[1]، سید وحید سپهر موسوی[2]، جواد امان‌آبادی[3]

1- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
تهران، صندوق پستی 1977714114، m.alinia@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 آبان 1396
پذیرش: 21 بهمن 1396
ارائه در سایت: 10 اسفند 1396

کلید واژگان:
عیب‌یابی
تحلیل اجزای اصلی
تابع پاسخ فرکانسی
الگوریتم اجتماع ذرات
الگوریتم ژنتیک

چکیده

وقوع خرابی در سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی در طول سرویس‌دهی، اجتناب‌ناپذیر است. پایش سلامت و عیب‌یابی این سیستم‌ها به نوبه‌ی خود می‌تواند از تلفات جانی و مالی جلوگیری کند. از مهم‌ترین روش‌های پایش سلامت و عیب‌یابی روش‌های مبتنی بر مشخصات ارتعاشی سازه می‌باشد، که بدون تمرکز بر نواحی خاص، سازه را مورد پایش کلی قرار می‌دهد. در این مطالعه جهت عیب‌یابی سازه‌های صفحه‌ای، با بهره‌گیری از تکنیک کاهش ابعاد داده‌ها توسط تحلیل اجزای اصلی، توابع پاسخ فرکانسی کاهش بعد داده شده، و شاخص‌هایی به‌عنوان شاخص خرابی معرفی گشته است. این شاخص‌های خرابی و عیب‌یابی صفحه به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطرح شده، و پس از آن با استفاده از الگوریتم‌های اجتماع ذرات و ژنتیک به حل مسئله بهینه‌سازی پرداخته شده است. با حل مسئله بهینه‌سازی مکان و شدت‌های خرابی تشخیص داده می‌شوند. برای ارزیابی و کارکرد روش ارائه شده و عملکرد الگوریتم‌های معرفی شده، چندین سناریوی خرابی شامل خرابی در یک ناحیه، خرابی هم‌زمان در دو ناحیه، و خرابی در سه ناحیه از سازه اعمال شده است، و بر این مبنا در مورد کارایی و کارکرد روش ارائه شده بحث می‌گردد. بر اساس نتایج حاصله، مشاهده شده که الگوریتم اجتماع ذرات در بحث تعیین شدت خرابی نسبت به الگوریتم ژنتیک از عملکرد و دقت بالایی برخوردار است. در سناریوهای پیچیده‌تر این افزایش دقت و کارایی بهتر بیشتر نمایان می‌شود.

Damage detection process comparison using various optimization algorithms in 3D plane elements based on dynamics properties of structure

Mohammad Mehdi Alinia*, Seyed Vahid Sepehr Mousavi, Javad Amanabadi

Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1977714114, Tehran, Iran, m.alinia@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 November 2017
Accepted 10 February 2018
Available Online 01 March 2018

Keywords:
Damage detection
Principle Component Analysis
Frequency Response Function
PSO Algorithm
Genetic Algorithm

ABSTRACT

Damage occurrence in structural and mechanical systems during utilization is an inevitable phenomenon. Death and financial losses could be prevented by health monitoring systems and damage detection processes in structures. In the mentioned framework, damage detection based on dynamics properties, is one of the most important and efficient methods, without concentration on special zones in structure. In this study frequency response functions were analyzed by principle component analysis, then, in order to complete process, dimension reduction and damage indices extraction were conducted. At the end, plate damage detection was introduced as an optimization problem considering extracted damage indices, and solution of the problem were given by PSO and Genetic algorithms. Output results consist of estimation about location and intensity of applied damage. Several scenarios including single, simultaneously dual and triple stiffness losses were figured out to investigate and evaluate the efficiency of the mentioned algorithms. Finally, outcome result around performance and utility of method had been discussed. It's obviously demonstrated that Particle Swarm Optimization algorithm has more accurate result, especially in estimation of damage location than Genetic algorithm optimization solution, during health monitoring processes. The mentioned conclusion has been gotten more explicit with getting scenario complicated.

1- مقدمه

سازه‌های عمرانی و مکانیکی همواره در معرض انواع تهدیدات طبیعی همانند زلزله، انفجار و حوادث قهری طبیعی قرار دارند. از طرف دیگر یک سازه پس از گذشت زمان و در اثر نوع کاربری و یا اعمال بارگذاری‌های بیش از مقادیر منظور شده در طراحی، ممکن است دچار خستگی و آسیب‌هایی شود که در صورت عدم اصلاح این آسیب‌ها، خرابی در سازه گسترش یافته و درنهایت باعث از بین رفتن آن می‌گردد. بیشتر چنین خرابی‌هایی را می‌توان با بررسی‌های اولیه از وضعیت موجود سازه‌ها اصلاح نمود. از طرف دیگر،

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. M. Alinia, S. V. Sepehr Mousavi, J. Amanabadi, Damage detection process comparison using various optimization algorithms in 3D plane elements based on dynamics properties of structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 237-246, 2018 (in Persian)

دست‌یابی و ایجاد بسترهای لازم جهت رسیدن به روش‌های قابل اعتماد در برآورد و تشخیص عیوب سازه‌ای از مهم‌ترین اهداف پژوهش‌های انجام شده در چند سال اخیر در این حوزه بوده است. با توجه به این موضوع که هر سازه ویژگی‌های خاص خود را دارا می‌باشد، دست‌یابی به روش‌های با قابلیت اطمینان بالا مخصوصاً در حوزه مهندسی عمران با چالشی جدی روبه‌رو است. پژوهش‌های زیادی در این حوزه صورت گرفته که نقطه مشترک تمام این تحقیقات تلاش برای به دست آوردن معیاری برای شناسایی وجود، موقعیت و شدت خرابی به کمک اطلاعات قابل اندازه‌گیری از سیستم سازه‌ای می‌باشد. از جمله اطلاعات قابل‌اندازه‌گیری سیستم‌های سازه‌ای، اطلاعات مودال سازه یا مشخصه‌های دینامیکی سازه اعم از فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و توابع پاسخ فرکانسی می‌باشد؛ که در این بخش چند مورد از این پژوهش‌ها با محوریت سازه‌های صفحه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فرکانس‌های طبیعی از اولین و رایج‌ترین مشخصات ارتعاشی در فرآیند عیب‌یابی می‌باشد و تحقیقات فراوانی نیز با محوریت تغییرات فرکانسی صورت پذیرفته است [1-3]. یئون استفاده از تغییرات در اشکال مودی و پارامتر شیب در شکل‌های مودی را جهت عیب‌یابی در یک تیر کنسولی پیشنهاد داد [4]. کیم و همکاران استفاده از منحنی اشکال مودی به همراه معیار تضمین مودی (MAC[1]) را در پروسه شناسایی خرابی به کار بردند [5]. ژاوو و همکاران به شناسایی خرابی در صفحات با استفاده از انحنای دو بعدی شکل مود به دست آمده از طریق موجک‌ها و تبدیل انرژی پرداختند [6]. نتایج حاصل از این روش در شناسایی خرابی در مدل عددی و آزمایشگاهی یک صفحه آلومینیومی نشان داد که این روش در شناسایی آسیب‌های کوچک و همچنین در محیط‌های آلوده به نویز عملکرد بهتری دارد. وانگ و همکاران از شاخص خرابی مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی برای تشخیص مکان و شدت خرابی در یک قاب سه‌دهانه با داده‌های ناقص اندازه‌گیری شده استفاده کردند [7]. هین و همکاران پارامتری به نام بردار مکان‌یابی آسیب را معرفی کردند، که به نوعی مشابه نیروی پسماند بود. پس از بسط دینامیکی این پارامتر در درجات آزادی معینی از مدل یک صفحه‌ی آلومینیومی، امکان شناسایی مکان آسیب و شدت آن به‌طور کیفی وجود داشت [8]. یام و همکاران حساسیت پارامترهای تشخیص خرابی به‌روش‌های دینامیکی و استاتیکی را در سازه‌های صفحه‌ای مورد مطالعه قرار دادند، و شاخص‌های خسارت را در حالت استاتیکی و دینامیکی ارائه نمودند. در روش دینامیکی دو شاخص برمبنای انحنای شکل مود و تابع پاسخ فرکانسی کرنشی پیشنهاد شد. سپس اثر تغییر در تعداد مودهای انتخابی و همچنین انتقال فرکانس‌های طبیعی بر این شاخص‌ها مورد بررسی قرار گرفت [9]. فان و کیو با استفاده از اطلاعات انرژی کرنشی روشی را برای شناسایی خرابی در سازه‌های صفحه‌ای ارائه دادند. در این روش با استفاده از انرژی کرنشی مودال المان، ماتریس‌های مکان‌یابی خرابی و تصحیح شدت خرابی تعریف شد. با استفاده از این مفاهیم، نسبت به شناسایی مکان و شدت خرابی در سازه‌های صفحه‌ای اقدام گردید [10]. خیانگ و همکاران یک روش دومرحله‌ای برای شناسایی خرابی در صفحات نازک ارائه دادند. در مرحله اول مکان آسیب با اعمال تبدیل موجک دو بعدی به اشکال مودی و شناسایی نقاط تکینگی مشخص شد. پس از شناسایی مکان خرابی در گام بعدی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای شناسایی شدت خرابی استفاده شد. همچنین نتایج با وجود نویز نیز بررسی گردید [11]. ژانگ و همکاران روشی را بر پایه انتقال سطح انحناء فرکانسی (FSS[2]) در سازه‌های صفحه‌ای پیشنهاد نمودند. روش پیشنهادی به‌وسیله مطالعات آزمایشگاهی و عددی، صحت‌سنجی شد. این روش از تکنیک برازش منحنی بر پایه رگرسیون محلی، برای شبیه‌سازی سطح انحناء فرکانسی در حالت سالم سازه استفاده می‌کند، و نیازمند تنها اطلاعات و داده‌های سازه معیوب می‌باشد. نتایج نشان دادند که سطح انحناء نسبت به خرابی‌های محلی بسیار حساس می‌باشد، و برای تشخیص خرابی‌های موضعی موفق عمل می‌کند. البته حساسیت پایین فرکانس طبیعی استفاده از این پارامتر دینامیکی را با مشکل مواجه کرده است. انحنای سطح انتقال فرکانسی یکی از پارامترهای ارتعاشی سازه است که نسبت به آسیب‌های سازه حساس بوده و می‌تواند به‌منظور شناسایی خرابی‌های موضعی به‌کار گرفته شود. نتایج عددی این مطالعه نشان می‌داد که اگر آسیب در حوالی نقاط گرهی رخ دهد شناسایی ان با این روش ممکن نیست [12]. یانگ و همکاران در تحقیقی با استفاده از شتاب‌های اندازه‌گیری شده از نقاط مختلف سازه به تخمین توان ارتعاشی و سپس شناسایی آسیب در سازه‌های صفحه‌ای پرداختند. در این مطالعه توان ارتعاشی به‌صورت نرخ انتقال انرژی از طریق سطح مقطع به عرض واحد در یک سازه در حال ارتعاش تعریف شد. محققین با اعمال آسیب به صورت ترک با طول محدود در مدل اجزای محدود یک صفحه‌ی دو بعدی نازک، مؤلفه‌ای از توان ارتعاشی را با استفاده از تابع پاسخ فرکانسی سازه تحت تحریک تصادفی تخمین زدند، و از آن برای تشخیص مکان و شدت خرابی بهره گرفتند [13]. ادیلسون و همکاران با توسعه الگوریتم ترکیبی پینکوس-نیلدر- مید برای شناسایی خرابی مبتنی بر مشخصات ارتعاشی در یک المان تیر یک‌سر گیردار، خرپایی، صفحه‌ای، قاب پرتال بهره بردند. اصلاح پیشنهادی آنها شامل کاهش دامنه نمونه‌گیری از فرمول پینکوس با مشخص نمودن حداکثر تعداد المان‌های آسیب‌دیده سازه بود [14]. فراهانی و پینمودا عیب‌یابی پل را براساس آنالیز سری زمانی و داده‌های ارتعاشی انجام دادند. در این مطالعه نخست برداشت‌های میدانی و آنالیز مودال تجربی روی پل صورت گرفت سپس براساس نتایج آنالیز مودال تجربی، مدل اجزای محدود سازه به‌روزرسانی شد، و یک شاخص جدید حساس به خرابی تعریف گردید. سپس تأثیر مکان خرابی، شدت خرابی و اثرات نویز بر داده‌های دینامیکی در پروسه شناسایی خرابی بررسی گردید [15]. در پژوهش حاضر یک سازه صفحه‌ای مستطیلی با شرایط دو لبه مرزی گیردار در نرم‌افزار انسیس مدل شده، با تحریک سازه در یک نقطه و برداشت داده در چهار نقطه با محدوده فرکانسی مناسب، پاسخ فرکانسی برداشت می‌گردد. سپس با استفاده از تکنیک تحلیل اجزای اصلی، ابعاد پاسخ فرکانسی سازه کاهش داده می‌شود. سناریوهای مختلف خرابی در نرم‌افزار انسیس اعمال و داده‌های فرکانسی برداشت و نسبت به کاهش ابعاد اقدام می‌گردد. شاخص خرابی برای هر سناریو تعریف شده و به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار متلب انتقال داده می‌شود. در نرم‌افزار متلب با انجام کدنویسی‌های لازم، لینک کردن با نرم‌افزار انسیس و پیاده‌سازی مسئله بهینه‌سازی براساس پاسخ‌های فرکانسی، نسبت به شناسایی سناریوهای خرابی اقدام می‌گردد.

2- مدل عددی

صفحه مورد استفاده در این پژوهش به طول 4 متر و عرض 3 متر با ضخامت 4 سانتی‌متر می‌باشد. دو لبه مجاور هم کاملاً به صورت گیردار و دو لبه دیگر به صورت آزاد در نظر گرفته شده است.

صفحه موردنظر از جنس فولاد با مدول الاستیسته 200 گیگاپاسکال و چگالی 7850 کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. این صفحه به 12 ناحیه تقسیم

[1] Modal Assurance Criterion
[2] Frequency Selective Surface

جدول 1 مشخصات هندسی و مکانیکی صفحه

Table 1 Geometric and mechanical properties of the plate

طول (cm)	400	مدول الاستیسیته (GPa)	200
عرض (cm)	300	چگالی (kg/m^3)	7850
ضخامت (cm)	4	ضریب پواسون	0.3

شده است. همچنین میرایی صفحه برابر با 0.05٪ در نظر گرفته شده است. جهت مدل کردن نوع صفحه موردنظر در انسیس، المان پوسته‌ای در سه بعد چهار گرهی به کار گرفته شده است. از جمله ویژگی‌های این المان می‌توان به قابلیت مدل‌سازی خمش و نیروهای غشایی اشاره کرد. المان چهار گرهی بوده و در هر گره دارای شش درجه آزادی است، و قابلیت انجام تغییر شکل‌های بزرگ نیز در این المان فراهم است. در راستای جهت X تعداد مش‌ها برابر 8 و در راستای جهت Y تعداد مش‌ها برابر با 6 در نظر گرفته شده است. نحوه مش‌زنی و ناحیه‌بندی در "شکل 1" نشان داده شده است. محل تحریک سازه نیز در گره 58 نشان داده شده است.

نتایج فرکانس‌های طبیعی مربوط به تحلیل مودال سازه در نرم‌افزار انسیس در جدول 2 نشان داده شده، و همچنین چهار مود اول سازه نیز در شکل 2 ارائه شده است.

2-1-تابع پاسخ فرکانسی

دینامیک سازه، رفتار سازه را تحت بارگذاری دینامیکی شرح می‌دهد. در حقیقت بارهای دینامیکی تابعی از زمان هستند و در نتیجه پاسخ‌های متغیر با زمان را ایجاد می‌نمایند. معادله حرکت دینامیکی یک سیستم به شرح زیر است [16]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

در رابطه فوق $[M]$ ماتریس جرم، $[K]$ ماتریس سختی سازه و $[C]$ ماتریس میرایی و f(t) نیروی تحریک می‌باشد. تابع پاسخ فرکانسی نیز براساس رابطه زیر به‌دست می‌آید:

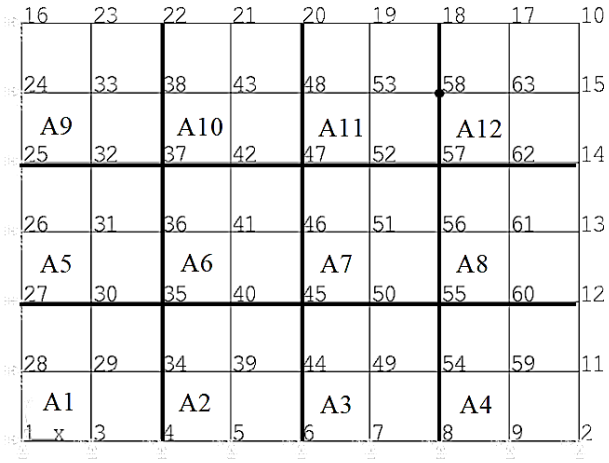


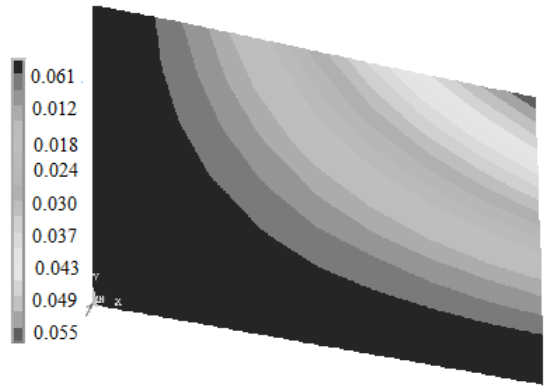
Fig. 1 meshing status and zoning configuration in studied case

شکل 1 نحوه مش‌زنی و ناحیه‌بندی صفحه مورد مطالعه

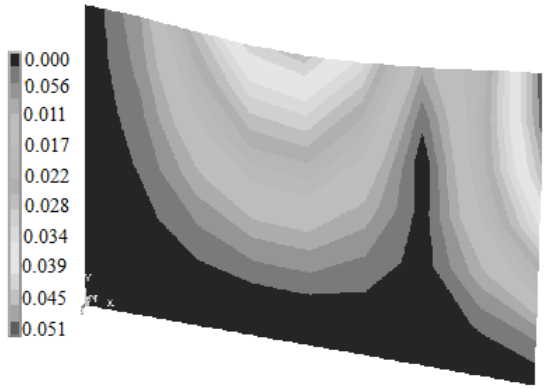
جدول 2 نتایج فرکانس‌های طبیعی حاصل از تحلیل مودال صفحه

Table 2 natural frequencies resulted in modal analysis of plate

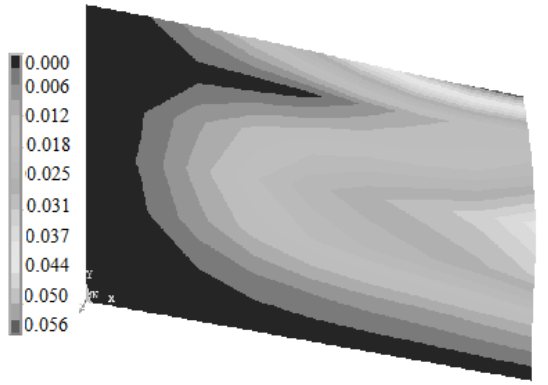
شماره مود	فرکانس (Hz)	شماره مود	فرکانس (Hz)
1	5.838	4	41.304
2	17.441	5	45.021
3	27.264	6	69.16



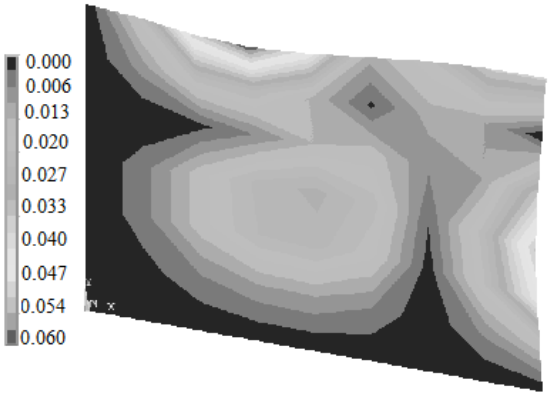
(a)مود اول جابجایی(m)



(b)مود دوم جابجایی(m)



(c)مود سوم جابجایی(m)



(d)مود چهارم جابجایی (m)

Fig. 2 plate modes a)first mode b)second mode c)third mode d) fourth mode

شکل 2 مودهای صفحه: a) مود اول b) مود دوم c) مود سوم d) مود چهارم

$$H(\omega)=\frac{(X(\omega))}{(F(\omega))}=1/\left((-\omega^2)[M]+j\omega[C]+[K]\right) \quad (2)$$

در حالت کلی برای یک سیستم چند درجه آزادی تابع پاسخ به‌صورت یک ماتریس تعریف می‌گردد، که این ماتریس متقارن به ماتریس تابع پاسخ معروف است. برای یک مؤلفه از تابع پاسخ داریم [16]:

$$H_{jk}(\omega)=\frac{\phi_{j1}\phi_{k1}}{{\omega_1}^2-\omega^2}+\frac{\phi_{j2}\phi_{k2}}{{\omega_2}^2-\omega^2}+\cdots+\frac{\phi_{jn}\phi_{kn}}{{\omega_n}^2-\omega^2} \quad (3)$$

در رابطه‌ی بالا ϕ_{ji} درایه‌های ماتریس مودال سازه، ω_i فرکانس طبیعی سیستم، و ω فرکانس تحریک سیستم هستند. در این پژوهش تابع پاسخ در چهار نقطه مطابق با جدول 3 اندازه‌گیری می‌شود.

3- تعریف خرابی

فرضیه اساسی پشت روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر ارتعاشات، تغییرات سختی است. دلیل اصلی استفاده از سختی به خاطر حساسیت کمتر جرم به تغییرات و دشواری مدل‌سازی با میرایی می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز خرابی به عنوان کاهش در سختی المان‌ها تعریف می‌گردد، که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$k_{ed}=(1-\beta_i)k_e \quad (4)$$

در رابطه بالا k_e ماتریس سختی یک المان یا یک ناحیه از صفحه می‌باشد. β_i درصد یا میزان خرابی المان و ناحیه موردنظر می‌باشد. k_{ed} ماتریس سختی المان در حالت خرابی می‌باشد. در نتیجه ماتریس سختی کلی سازه نیز برابر با K_d خواهد بود. معادله ارتعاشی سازه به‌صورت زیر در نظر گرفته خواهد شد:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K_d]\{u\}=\{f(t)\} \quad (5)$$

4- تحلیل اجزای اصلی تابع پاسخ فرکانسی

اگر در هر مجموعه داده n متغیر وجود داشته باشد هر متغیر می‌تواند دارای چند بعد باشد. با توجه به این‌که اغلب درک و شهود فضای چند بعدی دشوار است، روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی ابعاد کلیه مشاهدات را براساس شاخص ترکیبی و دسته‌بندی مشاهدات مشابه، کاهش می‌دهد. در این روش متغیرهای موجود در یک فضای چند حالته‌ی همبسته، به یک مجموعه از مؤلفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌شوند، که هر یک از آن‌ها ترکیب خطی از متغیرهای اصلی می‌باشند. مؤلفه‌های غیرهمبسته‌ی به‌دست آمده، مؤلفه‌های اساسی نامیده می‌شوند. که از بردارهای ویژه ماتریس همبستگی متغیرهای اصلی به‌دست می‌آیند [17]. روش کار الگوریتم تحلیل اجزای اصلی به این صورت است که محورهای مختصات جدیدی برای داده‌ها تعریف شده، و داده‌ها براساس این محورهای مختصات جدید بیان می‌شوند. اولین محور باید در جهتی قرار گیرد که واریانس داده‌ها بیشینه شود (جهتی که پراکندگی بیشتر است). دومین محور باید عمود بر محور اول به‌گونه‌ای قرار گیرد که واریانس داده‌ها بیشینه شود. به همین ترتیب محورهای بعدی در نظر گرفته می‌شود. اولین مؤلفه اساسی استخراج شده بیشترین مقدار پراکندگی داده‌ها را در کل مجموعه داده‌ها در نظر می‌گیرد. این امر بدان معنی است که اولین مؤلفه حداقل با تعدادی از متغیرها همبسته است. دومین مؤلفه استخراج شده دو ویژگی مهم دارد، این مؤلفه بیشترین واریانس مجموعه داده‌ها که توسط مؤلفه اول محاسبه نشده است را در نظر می‌گیرد، و ویژگی بعدی این است که مؤلفه دوم با مؤلفه اول همبستگی ندارد.

ماتریس پاسخ فرکانسی شامل تعداد بسیار زیادی از داده‌ها می‌باشد، که ذخیره‌سازی و کار با این حجم از داده‌ها بسیار مشکل است. لذا برای انجام پروسه عیب‌یابی در مطالعه حاضر، داده‌های فرکانسی فشرده‌سازی شده و کاهش بعد داده می‌شوند. اگر فرض کنیم داده‌های پاسخ فرکانسی سازه سالم $H_{m\times n}(\omega)=[h_{ij}(\omega)]_{m\times n}$ باشد که m تعداد نقاط برداشت و n تعداد فرکانس‌های تحریک می‌باشد. برای اعمال الگوریتم تحلیل اجزای اصلی روی توابع پاسخ فرکانسی ابتدا باید میانگین تمام ستون‌های ماتریس تابع پاسخ فرکانسی برابر صفر شده و انحراف استاندارد ستون‌ها نیز برابر واحد گردند [18]. سپس داده‌ها نرمال شده براساس روابط زیر جایگزین می‌گردند، تا تابع پاسخ فرکانسی جدید به‌دست آید ($\tilde{H}_{m\times n}(\omega)$). میانگین ستون jام ماتریس و انحراف استاندارد به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\bar{H}_j=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}h_{ij}(\omega) \quad (6)$$

$$S_j^2=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(h_{ij}(\omega)-\bar{H}_j)^2 \quad (7)$$

المان‌ها و داده‌های تابع پاسخ فرکانسی به‌صورت زیر جایگزین می‌گردند. هدف از این جایگزینی در واقع تغییر تابع پاسخ فرکانسی به صورتی است که ستون‌ها دارای میانگین صفر و انحراف استاندارد برابر واحد باشند [18].

$$\tilde{h}_{ij}(\omega)=\frac{h_{ij}(\omega)-\bar{H}_j}{S_j\sqrt{m}} \quad (8)$$

بعد از جایگزینی و تشکیل ماتریس تابع پاسخ فرکانسی جدید، ماتریس همبستگی را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$[C]_{n\times n}=[\tilde{H}]^{\mathrm{T}}_{n\times m}[\tilde{H}]_{n\times n} \quad (9)$$

مؤلفه‌های اساسی به صورت مقادیر ویژه، و بردارهای ویژه ماتریس همبستگی به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$[C]\{\psi_i\}=\lambda_i\{\psi_i\} \quad (10)$$

i در رابطه بالا اندیس مؤلفه اساسی می‌باشد. اولین مؤلفه اساسی که بالاترین مقدار ویژه و بردار ویژه متناظر را دارد، در جهت حداکثر پراکندگی داده‌ها می‌باشد. دومین مؤلفه اساسی عمود بر مؤلفه اول بوده و بیشترین تأثیر داده‌ها را شامل می‌شود. بقیه مؤلفه‌های اساسی نیز به همین ترتیب هستند. از آنجا که ماتریس همبستگی (C) مربع بوده دارای n مؤلفه اساسی می‌باشد، ماتریس پیش‌بینی تغییرات پاسخ به صورت زیر به دست می‌آید[18]:

$$[A]_{m\times n}=\left[\tilde{H}(\omega)\right]_{m\times n}[\psi]_{n\times n} \quad (11)$$

ماتریس پیش‌بینی و ماتریس مقادیر ویژه را می‌توان به دو ماتریس با p مؤلفه اساسی، به فرم زیر تجزیه کرد:

$$[A]_{m\times n}=[[A_1]_{m\times p}\vdots[A_2]_{m\times(n-p)}] \quad (12)$$

$$[\psi]_{m\times n}=[[\psi_1]_{n\times p}\vdots[\psi_2]_{n\times(n-p)}] \quad (13)$$

در نتیجه ماتریس تغییرات جدید با p مؤلفه اصلی به صورت زیر ساخته می‌شود:

$$[\tilde{H}_R]=[A_1]_{m\times p}[\psi_1]^{\mathrm{T}}{}_{p\times n} \quad (14)$$

$$h_{ijR}(\omega)=S_j\sqrt{m}\tilde{h}_{ijR}+\tilde{H}_j \quad (15)$$

براساس ماتریس تغییرات جدید و تابع پاسخ اولیه، شاخص خرابی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$DI=\frac{H_R}{H_{\text{baseline}}} \quad (16)$$

جدول 3 نقاط برداشت و جهت برداشت تابع پاسخ فرکانسی

Table 3 node and direction of frequency response function

نقاط برداشت	62	57	44	37
راستای برداشت	*Uz*	*Uz*	*Uz*	*Rx*

5- بهینه‌سازی

فرضیه اساسی پشت روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر ارتعاشات، تغییرات سختی است. دلیل اصلی استفاده از سختی به خاطر حساسیت کمتر جرم به تغییرات و دشواری مدل‌سازی با میرایی می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز خرابی به عنوان کاهش در سختی المان‌ها تعریف شده است. از طرف دیگر برای حل مسئله عیب‌یابی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. بنابراین لازم است تا ابزارهای یک مسئله بهینه‌سازی بر اساس مفاهیم ارتعاشات و عیب‌یابی تعریف گردند. اولین پارامتر فضای جستجوی جواب‌ها می‌باشد. از آن‌جا که خرابی به صورت کاهش در سختی تعریف شده، بنابراین این کاهش می‌تواند در بازه صفر و یک صورت پذیرد. صفر برای حالتی‌که ناحیه یا المان مورد بررسی کاملاً سالم است، و یک برای حالتی که المان کاملاً خراب شده و از بین رفته است. در نتیجه فضای جستجو در این بازه قرار گرفته، و بهینه‌سازی از نوع پیوسته است. تعداد متغیرهای تصمیم برابر تعداد نواحی تقسیم صفحه مورد نظر می‌باشد، که در این مطالعه صفحه به 12 قسمت تقسیم شده است. بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم برابر با 12 است. قیود مسئله نیز مقدار خرابی‌های هر ناحیه می‌باشد که با توجه به معادله (4) و فضای جستجو مقادیر βi بین صفر و یک خواهد بود. تابع هدف براساس شاخص‌های خرابی به صورت زیر تعریف می‌گردد[19]:

$$E(\alpha)=\sum_{a=1}^{R}\sum_{p=1}^{M}\frac{\left|DI_{ak}(\omega_p,\alpha)-DI_{ak}^{m}(\omega_p)\right|}{\max\left(DI_{ak}^{m}(\omega_p)\right)} \tag{17}$$

$DI_{ak}(\omega_p,\alpha)$ شاخص خرابی در حالت خرابی به اندازه α بوده که توسط الگوریتم محاسبه شده، $H_{ak}^{m}(\omega_p)$ شاخص خرابی مربوط به داده‌های برداشت شده‌ی سناریوی مورد نظر می‌باشد. R بیانگر تعداد پاسخ‌های برداشت شده می‌باشد. ω_p نیز فرکانس‌های تحریک سازه می‌باشد. M تعداد فرکانس‌های تحریک می‌باشد.

5-1- الگوریتم اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات، یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا اکتشافی است که از حرکت گروهی حیواناتی نظیر پرندگان که زندگی جمعی دارند، الگو گرفته شده است. در این الگوریتم هر پاسخ مسئله به صورت یک ذره که دارای یک مقدار و همچنین میزان تناسب است، مدل می‌شود. الگوریتم اجتماع ذرات برای اولین بار در سال 1995 توسط جیمز کندی[1] و راسل ایبرهارت[2] در قالب یک مقاله کنفرانس ارائه گردید [20]. در این الگوریتم هر عضو از جامعه موقعیت خود را با توجه به تجربیات شخصی و تجربیات کل جامعه تغییر می‌دهد. همچنین هر ذره در حال جستجو برای نقطه بهینه و در حال جابجایی و دارای سرعت است، و همه ذرات در فضای جستجو حرکت می‌کنند. هر ذره دارای یک هوش ذاتی است، که در هر مرحله بهترین موقعیتی را که داشته به خاطر سپرده و در گروه، تبادل اطلاعات می‌کند. حرکت هر ذره بستگی به چند عامل دارد: 1) موقعیت فعلی ذره، 2) بهترین موقعیتی که ذره تا حال داشته است، 3) سرعت ذرات، و 4) بهترین موقعیتی که کل ذرات داشته‌اند. موقعیت فعلی ذرات با X_i ها، و بهترین موقعیت قبلی ذرات با Y_i ها و همچنین سرعت ذرات با V نمایش داده می‌شود. ارتباط ذرات (هوش اجتماعی) با هم باعث می‌شود تا گروه ذرات بتوانند ذره‌ای را که در بهترین موقعیت قرار دارد مشخص کنند، و همه ذرات به نسبت سرعتی که دارند به سمت موقعیت بهترین ذره حرکت کنند، سپس هر ذره در موقعیت فعلی فضای جستجوی خود را بررسی می‌کند. این کار تا رسیدن به موقعیت مطلوب تکرار می‌گردد. البته در همه مراحل هوش فردی و اجتماعی دخیل هستند. در واقع هر ذره از تجربه شخصی خود (جستجوی محلی) و تجربه دیگر جفت‌ها (جستجوی کلی) بهره می‌برد. با توجه به مطالب فوق در هر سیکل، یک ذره که بهترین جواب را ارائه کرده، مشخص شده و موقعیت این ذره در محاسبات موقعیت جدید، برای همه ذرات وارد می‌گردد.

در روابط الگوریتم اجتماع ذرات ضرایب مثبت C_1 و C_2 فاکتور یا نرخ یادگیری نامیده می‌شوند، و اعداد ثابت هستند. rand_1 و rand_2 دو عدد مستقل تصادفی بین صفر و یک می‌باشند، و Y_i^* بهترین راه‌حل فعلی از بین همه راه‌حل‌ها است. w فاکتور اینرسی است که به‌منظور کنترل تأثیر سرعت‌های قبلی بر سرعت‌های فعلی ذرات به‌کار می‌رود. و از هر سیکل به سیکل دیگر تغییر کند. پارامترهای اولیه به‌صورت $C_2=1.9$، $C_1=2.1$ و $W=0.7$ در نظر گرفته شده، و تعداد ذرات نیز معمولاً بین 40 تا 65 می‌باشد.

$$X_i'=X_i+V_i' \tag{18}$$

$$V_i'=w\times V_i+C_1\times \mathrm{rand}_1\times(Y_i-X_i)+C_2\times \mathrm{rand}_2\times(Y_i^*-X_i) \tag{19}$$

5-2- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک که منشعب شده از الگوریتم‌های تکاملی و اصل تکامل طبیعی داروین می‌باشد، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی بوده و بر اساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها و قواعد موروثی پایه‌ریزی شده است. این الگوریتم دارای چهار عملگر اصلی برازش، انتخاب، ادغام (ترکیب) و جهش است که توسط هالند[3] در دانشگاه میشیگان مطرح شد و پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش از جمله گلدبرگ[4] توسعه یافت. الگوریتم ژنتیک در هر تکرار چند نقطه از فضای جستجو را در نظر می‌گیرد، بنابراین شانس این‌که به یک ماکزیمم محلی همگرا شود، کاهش می‌یابد. روش کار این الگوریتم از روش‌های جستجوی تصادفی متفاوت است، زیرا اگرچه برای تعریف روش‌های تصمیم‌گیری از تصادف و شانس استفاده می‌کند، ولی در فضای جستجو به صورت تصادفی قدم نمی‌زند، بلکه از قوانین احتمالی پیروی می‌کند [21]. در الگوریتم ژنتیک به‌عنوان اولین مرحله لازم است مجموعه‌ای از جواب‌های شدنی به‌عنوان جمعیت اولیه ایجاد شود. اعضای این مجموعه معمولاً به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. هر جمعیت یا یک نسل از کروموزوم‌ها، دارای یک اندازه می‌باشد، که به اندازه جمعیت معروف است. اندازه جمعیت معرف تعداد کروموزوم‌های موجود در جمعیت یا یک نسل است. اگر تعداد کروموزوم‌ها خیلی کم باشد، امکان شکل‌گیری عملیات جابه‌جایی به‌وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک بسیار کم خواهد بود، و تنها قسمت کمی از فضای جستجو مورد کاوش قرار خواهد گرفت. از طرف دیگر، اگر تعداد کروموزوم‌ها خیلی زیاد باشد، سرعت الگوریتم بسیار کند خواهد شد. اندازه جمعیت باید براساس نوع مسأله و کدگذاری آن تعریف شود. البته روش‌ها و فرمول‌های مختلفی برای تعیین اندازه جمعیت وجود دارد. در جدول زیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک تنظیم شده است، که جمعیت اولیه بین 90 تا 110 می‌باشد.

6- بحث و نتایج

در این پژوهش جهت عیب‌یابی یک سازه صفحه‌ای از توابع پاسخ فرکانسی

[1] James Kennedy
[2] Russell Eberhart
[3] Holland
[4] Goldberg

جدول 4 مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله عیب‌یابی

Table 4 parameters of Genetic algorithm in optimization problem

نوع پارامتر	(جمعیت جهش یاقتگان)n_m	P_m	(جمعیت فرزندان)n_c	(درصد جمعیت فرزندان)P_c
مقدار	(راوند$\frac{P_c \times n_{pop}}{2}$)	0.3	2 × (راوند$\frac{P_c \times n_{pop}}{2}$)	0.8

استفاده می‌گردد. برای این منظور سازه مورد نظر با فرکانس‌های تحریک در بازه صفر تا 200 تحریک شده و پاسخ‌های فرکانسی در 4 نقطه برداشت می‌گردد. ماتریس پاسخ فرکانسی با روش تحلیل مؤلفه اساسی کاهش بعد داده می‌شود. تعداد 50 مؤلفه اساسی (مقدار ویژه ماتریس همبستگی) برای کاهش بعد پاسخ فرکانسی استفاده می‌شود، بدین ترتیب شاخص‌های خرابی تعریف می‌گردند. سه سناریو به شرح زیر جهت ارزیابی روش ارائه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

6-1- سناریوی اول

سناریوی اول به صورت خرابی در ناحیه شماره 8 به اندازه 40٪ در نظر گرفته شده است. نحوه تغییرات شاخص‌های خرابی در "شکل 3" نشان داده شده است. مقادیر خرابی محاسبه شده توسط الگوریتم اجتماع ذرات و الگوریتم ژنتیک در "شکل 4 و 5" نمایش داده شده است. الگوریتم اجتماع ذرات با تعداد جمعیت برابر 40، محل خرابی را به‌درستی تشخیص داده است. همچنین میزان خرابی نیز دقیقاً برابر با 40٪ محاسبه شده است. این الگوریتم برای ناحیه شماره 3 خرابی به میزان 1٪ محاسبه نموده و بقیه نواحی را سالم تشخیص داده است. الگوریتم ژنتیک نیز مطابق "شکل 5" با جمعیت اولیه برابر با 95، تعداد فرزندان برابر با 76 و تعداد جمعیت جهش‌یافته برابر با 28، برای ناحیه شماره 3 خرابی به میزان 39.2٪ برآورد نموده است. در این الگوریتم برای نواحی 2، 10 و 11 خرابی‌های به میزان به ترتیب 5٪، 3٪ و 2٪ اختصاص داده شده است. "شکل 6" نیز نحوه همگرایی تابع هدف در هر دو الگوریتم را مشخص می‌نماید. مطابق این شکل مشخص است که الگوریتم اجتماع ذرات با تعداد تکرار بسیار کمتر و با سرعت بیشتری به مقدار صفر همگرا شده است. همچنین میزان خرابی‌های محاسبه شده نیز مبین دقت بالا در این الگوریتم می‌باشد.

6-2- سناریوی دوم

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مورد بحث، سناریوی دوم شامل خرابی در دو ناحیه از صفحه در نظر گرفته شده است. برای این سناریو خرابی‌هایی به میزان 35٪ در ناحیه یک و 8٪ در ناحیه 12 در مدل اجزای محدود اعمال شده است. تغییرات شاخص خرابی در نقاط اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی در "شکل 7" نمایش داده شده است. الگوریتم اجتماع ذرات با تعداد جمعیت برابر 90 و تعداد تکرار برابر 130 برای این سناریو تنظیم شده است. نتایج حاصل از حل مسئله توسط این الگوریتم در "شکل 8" می‌باشد. الگوریتم در تشخیص محل خرابی‌های اعمالی موفق عمل کرده و در تشخیص شدت خرابی نیز از کارکرد بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. شدت خرابی در ناحیه12 دقیقاً محاسبه شده و در ناحیه شماره 1 با میزان واقعی، 0.2٪ تفاوت دارد. الگوریتم ژنتیک نیز با 105 والد، 85 فرزند و 32 جمعیت جهش‌یافته، نتایجی به شرح "شکل 9" محاسبه نموده است. مقدار محاسبه شده برای ناحیه 1 به اندازه 4٪ با میزان واقعی و برای ناحیه 8 به میزان 0.9٪ تفاوت دارد. همچنین برای نواحی سالم 8 و 11 خرابی‌هایی به میزان 2٪ و 3٪

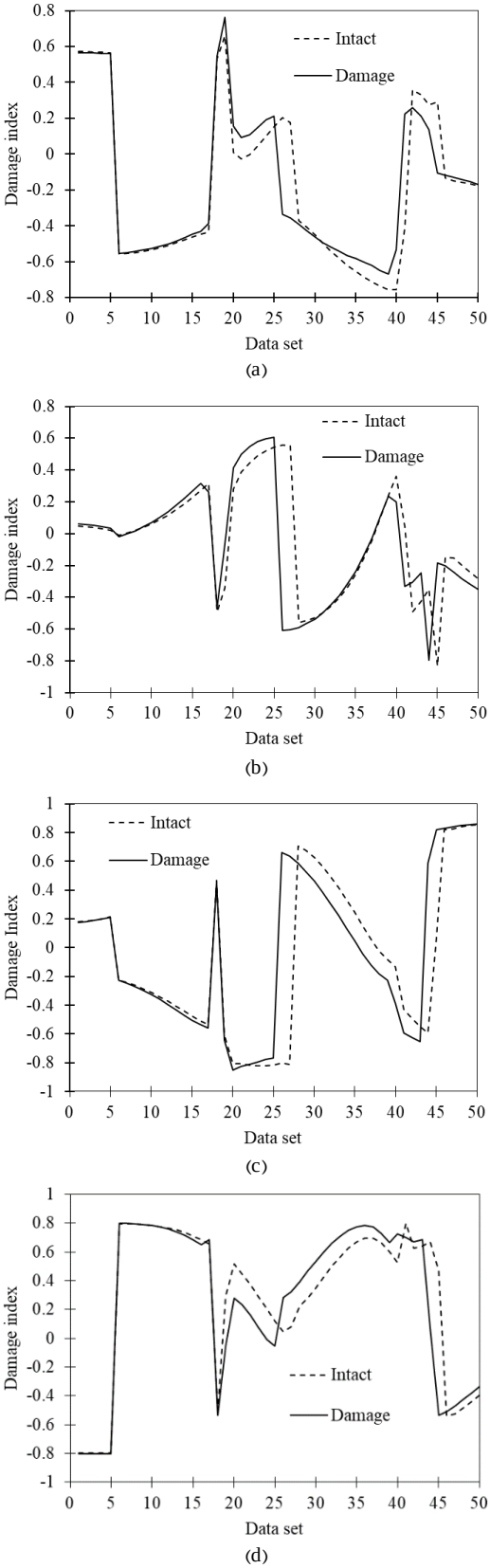


Fig. 3 variation of measured damage index for first scenario in nodes a)37 b)44 c)57 d)62

شکل 3 تغییرات شاخص خرابی اندازه‌گیری شده برای سناریوی اول در نقاط a)37 b)44 c)57 d)62

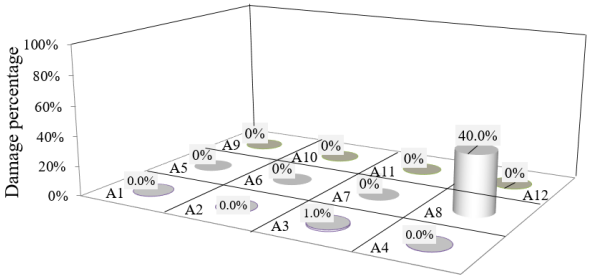


Fig. 4 calculated damage amount in first scenario by PSO algorithm

شکل 4 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی اول توسط الگوریتم اجتماع ذرات

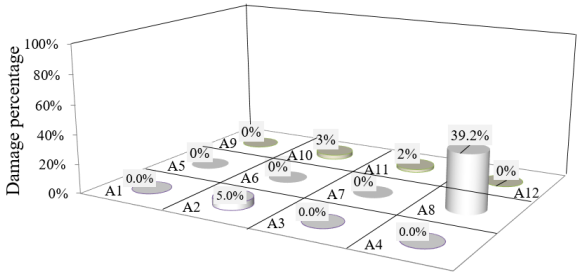


Fig. 5 calculated damage amount in first scenario by Genetic algorithm

شکل 5 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی اول توسط الگوریتم ژنتیک

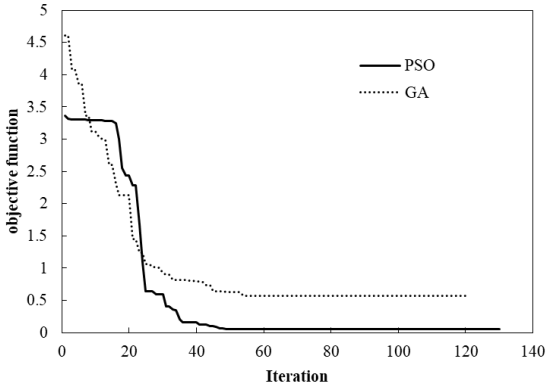


Fig. 6 convergence of objective function in optimization problem process in first scenario

شکل 6 نمودار نحوه همگرایی تابع هدف در فرآیند حل مسئله برای سناریوی اول

محاسبه شده است. در این سناریو نیز همانند سناریوهای قبلی، الگوریتم اجتماع ذرات از نرخ همگرایی بسیار بیشتری نسبت به ژنتیک برخوردار است، به طوری که در تکرار حدود 40 به عدد صفر همگرا شده ولی الگوریتم ژنتیک در تکرار 150 هم فاصله بیشتری با نقطه همگرایی دارد. نمودار همگرایی در "شکل 10" انعکاس یافته است.

3-6- سناریوی سوم

این سناریو برای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم در حالتی که خرابی به صورت هم‌زمان در سه ناحیه از سازه موردنظر باشد، طرح‌ریزی شده است. در این سناریو 12٪ خرابی در ناحیه شماره 4، 20٪ خرابی در ناحیه شماره 10 و خرابی با شدت 5٪ در ناحیه 12 اعمال‌شده است. نحوه تغییرات شاخص‌های تعریف شده در نقاط برداشت پاسخ فرکانسی در "شکل 11" نشان داده شده است. در این سناریو الگوریتم اجتماع ذرات با 90 جمعیت و 120 تکرار نتایجی مطابق با "شکل 12" ارائه کرده است. در این سناریو نیز الگوریتم اجتماع ذرات هم در بحث مکان‌یابی، و هم در بحث تشخیص شدت خرابی، با کمترین خطا سناریوی اعمالی را محاسبه نموده است. برای ناحیه سالم

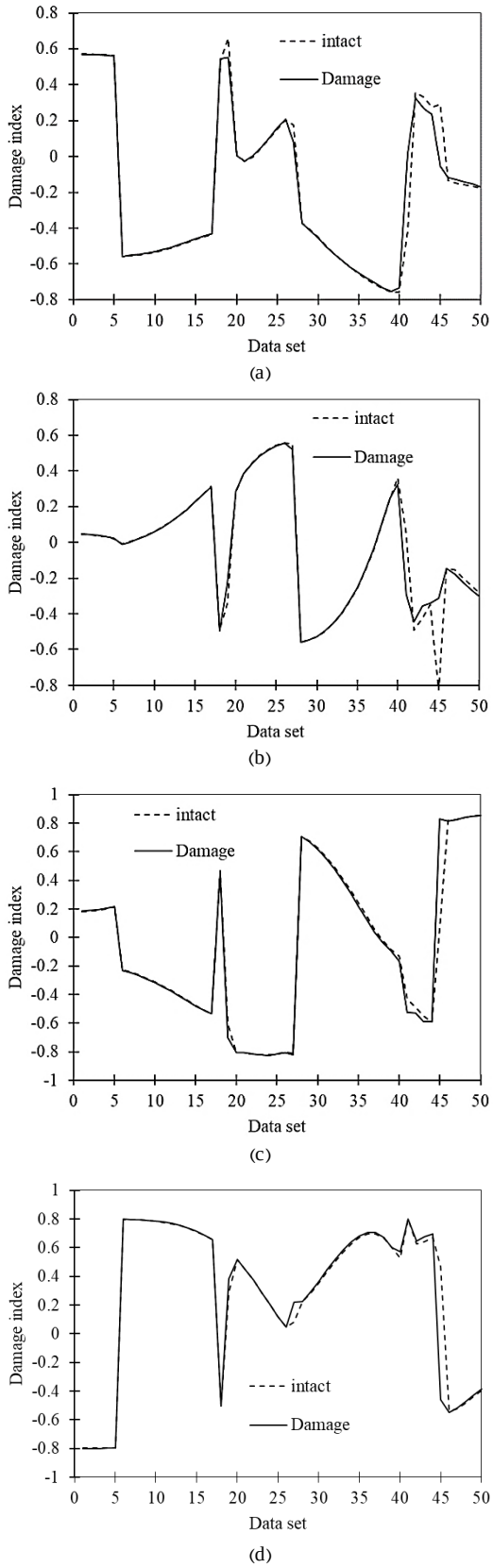


Fig. 7 variation of measured damage index for second scenario in nodes a)37 b)44 c)57 d)62

شکل 7 تغییرات شاخص خرابی اندازه‌گیری شده برای سناریوی دوم در نقاط a)37 b)44 c)57 d)62

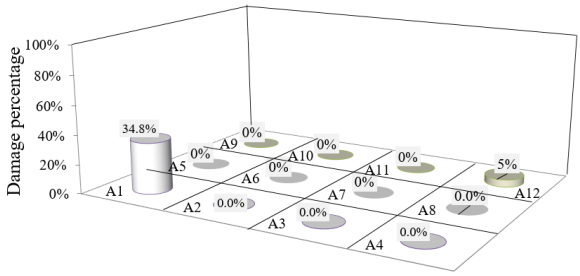


Fig. 8 calculated damage amount in second scenario by PSO algorithm

شکل 8 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی دوم توسط الگوریتم اجتماع ذرات

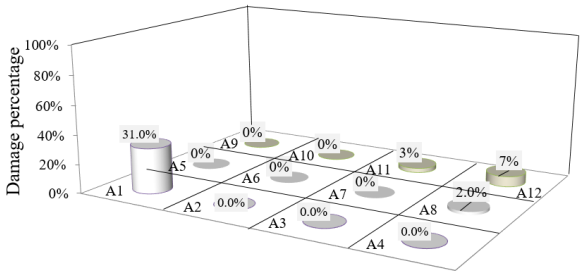


Fig. 9 calculated damage amount in second scenario by Genetic algorithm

شکل 9 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی دوم توسط الگوریتم ژنتیک

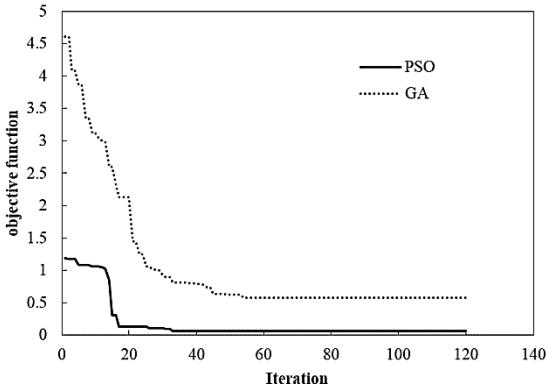


Fig. 10 convergence of objective function in optimization problem process in second scenario

شکل 10 نمودار نحوه همگرایی تابع هدف در فرآیند حل مسئله برای سناریوی دوم

شماره 9 خرابی بالغ بر 2٪ محاسبه شده، که قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. به علاوه نتایج الگوریتم ژنتیک در این سناریو از دقت بسیار پایین‌تری برخوردار است، به‌طوری که شدت خرابی برای ناحیه 12 دقیقاً محاسبه شده است. برای ناحیه شماره 10 شدت خرابی به میزان 7٪ با میزان واقعی تفاوت دارد. برای ناحیه سالم 3 و 6 خرابی به اندازه 7.6٪ و 5٪ برآورد شده است، که میزان بیشتری می‌باشد. برای سایر نواحی سالم نیز خرابی‌های مطابق با "شکل 13" محاسبه شده است، که حاکی از کاهش دقت الگوریتم ژنتیک در حل مسئله می‌باشد. در این سناریو نیز همانند سناریوهای قبلی، با توجه به "شکل 14" الگوریتم اجتماع ذرات با شدت بیشتری به سمت صفر همگرا شده است، این در حالی است که الگوریتم ژنتیک با تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف بیشتر و تکرار بیشتر، منجر به نتایج بهتری نشده است.

4-6- سناریوی چهارم

در این سناریو تأثیر نویزها و خطاها در مرحله‌ی برداشت و پردازش داده مورد بررسی قرار می‌گیرد. تابع پاسخ فرکانسی در برابر نویز، نسبت به دیگر

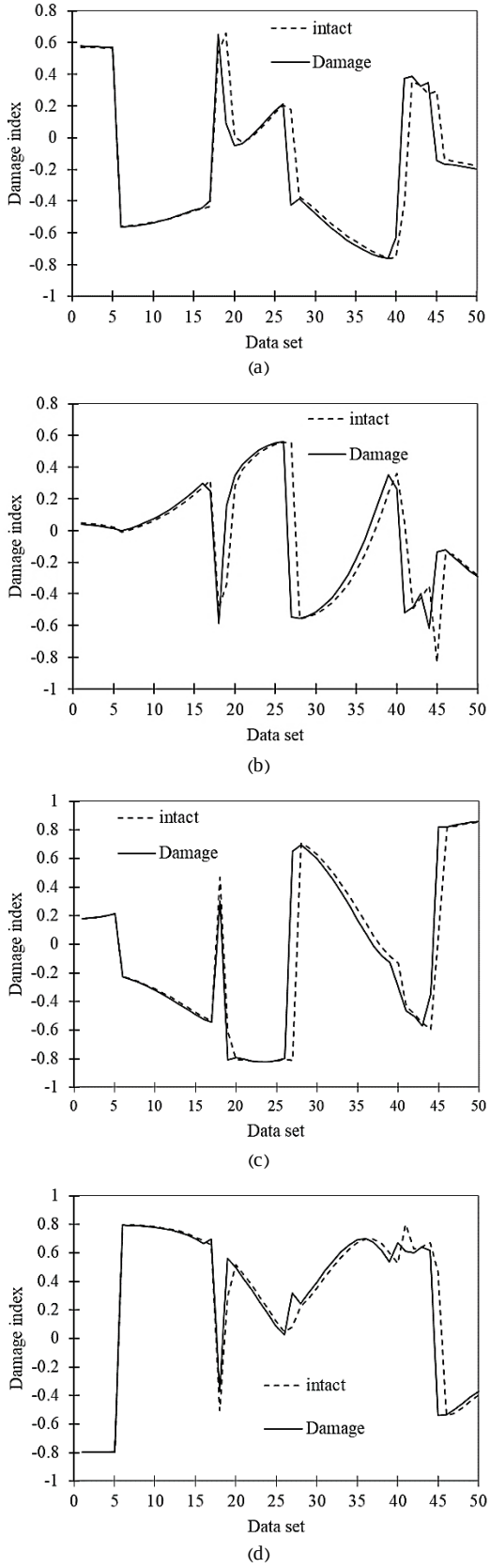


Fig. 11 variation of measured damage index for third scenario in nodes a)37 b)44 c)57 d)62

شکل 11 تغییرات شاخص خرابی اندازه‌گیری شده برای سناریوی سوم در نقاط a)37 b)44 c)57 d)62

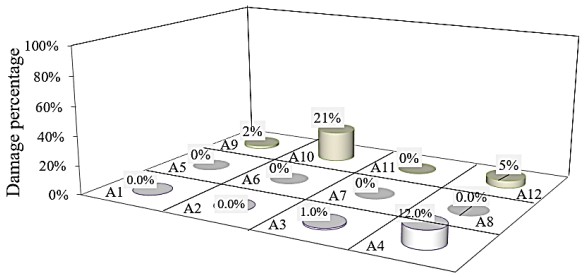


Fig. 12 calculated damage amount in third scenario by PSO algorithm

شکل 12 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی سوم توسط الگوریتم اجتماع ذرات

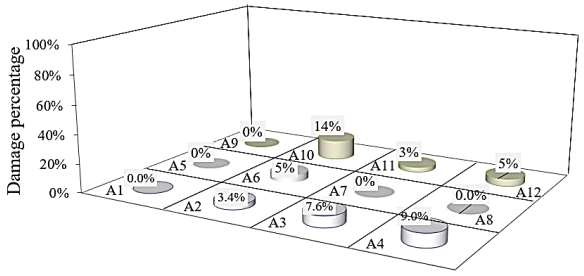


Fig. 13 calculated damage amount in third scenario by Genetic algorithm

شکل 13 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی سوم توسط الگوریتم ژنتیک

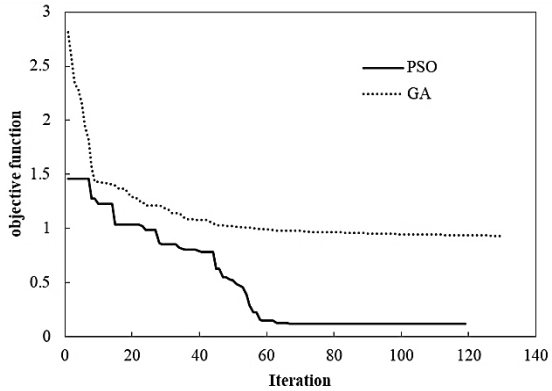


Fig. 14 convergence of objective function in optimization problem process in third scenario

شکل 14 نمودار نحوه همگرایی تابع هدف در فرآیند حل مسئله برای سناریوی سوم

پارامترهای مودال و ارتعاشی از حساسیت بسیار پایین برخوردار است. به‌طوری‌که بیشترین حساسیت این پارامتر در فرکانس‌های تحریک نزدیک به فرکانس طبیعی می‌باشد، و در دیگر بازه های تحریک از حساسیت به مراتب پایین‌تری برخوردار است. در این سناریو که همان سناریوی دوم خرابی است، دو سطح نویز در نظر گرفته شده که با توزیع نرمال تصادفی، روی داده‌های پاسخ فرکانسی اعمال می‌گردد. به‌علاوه تعداد 50 شبیه‌سازی خرابی نیز براساس آنالیز مونت کارلو در نظر گرفته شده است. میانگین پاسخ‌های تولید شده به‌عنوان نتایج و پاسخ الگوریتم‌ها در "اشکال 15 و 16" انعکاس یافته است. در این سناریوها هم عملکرد الگوریتم اجتماع ذرات در تشخیص مکان خرابی‌های اعمالی با نتایج موفق‌تری همراه بوده است. هر چند شدت‌های خرابی محاسبه شده، تغییرات اندکی نسبت به حالت بدون نویز دارد اما تعداد المان‌های سالم بیشتری را به‌صورت خراب تشخیص داده است، که عمدتاً در

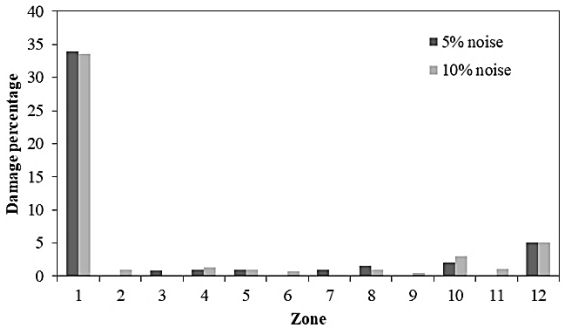


Fig. 15 calculated damage amount in fourth scenario by PSO algorithm

شکل 15 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی چهارم توسط الگوریتم اجتماع ذرات

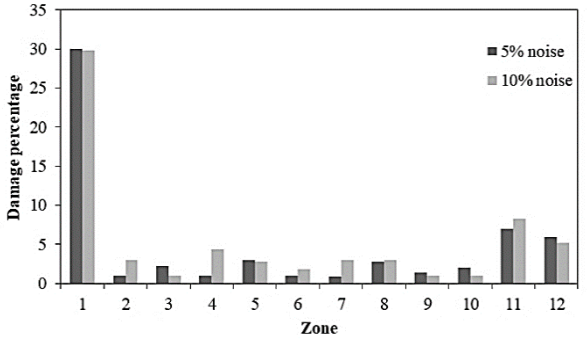


Fig. 16 calculated damage amount in fourth scenario by Genetic algorithm

شکل 16 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی چهارم توسط الگوریتم ژنتیک

شدت‌های پایین می‌باشد.

5-6- سناریوی پنجم

در سناریوی پنجم جهت بررسی دقیق‌تر و موضعی‌تر خرابی، صفحه مورد اشاره به 24 ناحیه تقسیم‌بندی شده و با مش‌های ریزتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر چند در سناریوهای قبلی بحث استقلال مش رعایت شده بود و پاسخ المان محدود دستخوش تغییر قابل توجهی نمی‌شد. در این سناریو خرابی 40% در ناحیه 24 و خرابی 35% در ناحیه 15 در نظر گرفته شده است، و برای آن روی داده‌های اندازه‌گیری شده 5% نویز با توزیع تصادفی اعمال و 50 شبیه‌سازی خطا صورت گرفته است. میانگین پاسخ‌ها در "اشکال 17 و 18" نشان داده شده است. در این سناریو نیز هر دو الگوریتم در

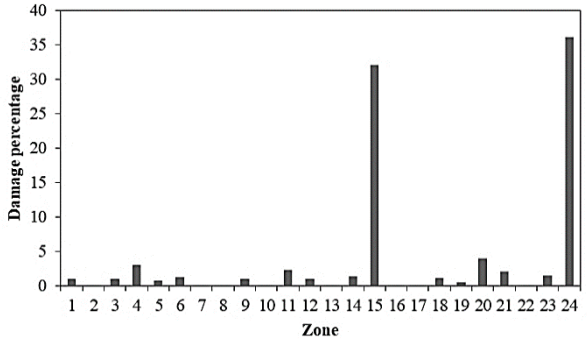


Fig. 17 calculated damage amount in fifth scenario by PSO algorithm

شکل 17 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی پنجم توسط الگوریتم اجتماع ذرات

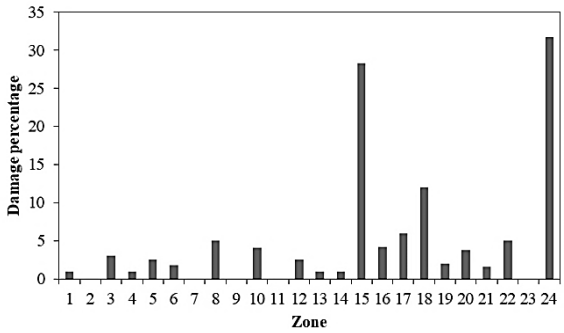


Fig. 18 calculated damage amount in fifth scenario by Genetic algorithm

شکل 18 مقادیر خرابی محاسبه شده برای سناریوی پنجم توسط الگوریتم ژنتیک

تشخیص محل خرابی‌های عمده موفق بودند. اما شدت‌های خرابی محاسبه شده توسط PSO همانند سناریوهای قبلی بهتر و دقیق‌تر می باشد.

7- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر در راستای امکان‌سنجی به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری، اجتماع ذرات و الگوریتم ژنتیک در فرایند پایش سلامت سازه صورت گرفت. در این راستا مدل یک سازه صفحه‌ای با ابعاد 3 متر در 4 متر مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های خسارت مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی که توسط الگوریتم تحلیل اجزای اصلی کاهش بعد داده شده بودند، به‌عنوان توابع هدف مسئله بهینه‌سازی تعریف شدند. سناریوهای مختلف خرابی نیز برای ارزیابی عملکرد این دو الگوریتم در جهت حل مسئله عیب‌یابی و تشخیص مکان‌ها و شدت‌های خرابی، روی سازه مورد نظر اعمال گردیدند. سناریوی اول خرابی با اعمال خرابی در یک ناحیه از صفحه مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول خرابی 40٪ در ناحیه شماره 8 اعمال گردید، که هر دو الگوریتم در تشخیص محل خرابی اصلی موفق عمل نمودند. الگوریتم اجتماع ذرات شدت خرابی را نیز دقیقاً بدون هیچ خطایی محاسبه نمود و باقی نواحی را نیز سالم تشخیص داد. الگوریتم ژنتیک مقدار خرابی را حدود 39٪ محاسبه نمود، ولی برای پاره‌ای از نواحی کاملاً سالم خرابی‌هایی نیز منظور نمود(برای ناحیه 2 خرابی 5٪ محاسبه کرد). سناریوی دوم به صورت خرابی هم‌زمان در دو ناحیه از صفحه اعمال گردید. سناریو دوم شامل خرابی در ناحیه 1 و 12 به ترتیب به میزان 35٪ و 8٪ اعمال گردید که الگوریتم اجتماع ذرات در این سناریو نیز کاملاً موفق عمل نمود. میزان خرابی ناحیه شماره 12 بدون هیچ خطایی و مقدار خرابی در ناحیه شماره 1 نیز به میزان 34.8٪ محاسبه شد. الگوریتم ژنتیک نیز خرابی ناحیه شماره 12 را 7.1٪ و ناحیه شماره 1 را 31٪ محاسبه نمود. همچنین برای ناحیه شماره 11 خرابی در حدود 3٪ برآورد کرده بود. سناریوی سوم که یک سناریوی پیچیده‌تر و چالشی بود به‌صورت اعمال خرابی هم‌زمان در سه ناحیه از صفحه مشتمل بر خرابی 12٪ در ناحیه 4، خرابی 20٪ در ناحیه 10 و خرابی 5٪ در ناحیه 12 در نظر گرفته شد. الگوریتم اجتماع ذرات در این سناریو در تشخیص مکان هر سه ناحیه اعمال خرابی، عملکرد جالب و موفقیت‌آمیزی داشت. الگوریتم ژنتیک در این سناریو نواحی سالم بیشتری را خراب تشخیص داده و شدت‌های خرابی بیشتری نیز برای این نواحی اختصاص داده است. این نتایج حاکی از دقت بهتر الگوریتم اجتماع ذرات می‌باشد، به‌طوری که در این سناریو نیز، این الگوریتم از نرخ رشد همگرایی بالاتر و زمان محاسبه‌ی، به مراتب کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک برخوردار بود. در این پژوهش که الگوریتم اجتماع ذرات از نوع الگوریتم‌های هوش ازدحامی و ژنتیک از نوع تکاملی است، در یک نتیجه‌گیری کلی در مقایسه‌ی این دو، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: اولاً الگوریتم اجتماع ذرات از دقت بیشتری در برآورد شدت‌های خرابی برخوردار بود. ثانیاً تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف در این الگوریتم به مراتب کمتر از الگوریتم ژنتیک بوده، و از طرف دیگر دارای نرخ رشد همگرایی بیشتری بوده است. به علاوه کمتر بودن دفعات ارزیابی تابع هدف در الگوریتم اجتماع ذرات، و نرخ رشد بیشتر در آن، موجب کاهش چشم‌گیر زمان اجرای برنامه نسبت به الگوریتم ژنتیک شده است.

8- مراجع

[1] C. R. Farrar, K. Worden, An introduction to structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 365, No. 1851, pp. 303-315, 2007.

[2] M. K. Soderqvist, M. Veljola, Finnish project level bridge management system, *Transportation Research Board Circular* 498, 1999.

[3] J. J. Zhao, D. E. Tonias, *Bridge Engineering: Design, Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges*, Fourth Edittion, pp. 88-97, New York: McGraw-Hill, 2017.

[4] M. M. F. Yuen, A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 103, No. 3, pp. 301-310, 1985.

[5] J. H. Kim, H. S. Jeon, C. W. Lee, Applications of the modal assurance criteria for detecting and locating structural faults, in *Proceeding of Sem Society for Experimental Mechanics Inc*, pp. 536-536. 2012.

[6] W. Xu, M. Cao, W. Ostachowicz, M. Radzieński, N. Xia, Two-dimensional curvature mode shape method based on wavelets and Teager energy for damage detection in plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 347, pp. 266-278, 2015.

[7] Z. Wang, R. Lin, M. Lim, Structural damage detection using measured FRF data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 147, No. 1-2, pp. 187-197, 1997.

[8] D. Huynh, J. He, D. Tran, Damage location vector: A non-destructive structural damage detection technique, *Computers & Structures*, Vol. 83, No. 28, pp. 2353-2367, 2005.

[9] L. Yam, Y. Li, W. Wong, Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches, *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 11, pp. 1465-1475, 2002.

[10] W. Fan, P. Qiao, Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study, *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-111, 2011.

[11] J. Xiang, M. Liang, A two-step approach to multi-damage detection for plate structures, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 91, pp. 73-86, 2012.

[12] Y. Zhang, L. Wang, S. T. Lie, Z. Xiang, Damage detection in plates structures based on frequency shift surface curvature, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 25, pp. 6665-6684, 2013.

[13] Z. B. Yang, X. F. Chen, Y. Xie, X. W. Zhang, The hybrid multivariate analysis method for damage detection, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 23, No. 1, pp. 123-143, 2016.

[14] I. A. Nhamage, R. H. Lopez, L. F. F. Miguel, An improved hybrid optimization algorithm for vibration based-damage detection, *Advances in Engineering Software*, Vol. 93, pp. 47-64, 2016.

[15] R. V. Farahani, D. Penumadu, Damage identification of a full-scale five-girder bridge using time-series analysis of vibration data, *Engineering Structures*, Vol. 115, pp. 129-139, 2016.

[16] W. Weaver Jr, P. R. Johnston, *Structural Dynamics by Finite Elements*, pp. 452-520., Australia: Prentice-Hall Englewood Cliffs (NJ), 1987.

[17] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Second Edition, pp. 75-97., London, UK: Wiley Online Library, 2002.

[18] Y. Ni, X. Zhou, J. Ko, Experimental investigation of seismic damage identification using PCA-compressed frequency response functions and neural networks, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 1, pp. 242-263, 2006.

[19] S. Mohan, D. K. Maiti, D. Maity, Structural damage assessment using FRF employing particle swarm optimization, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 219, No. 20, pp. 10387-10400, 2013.

[20] R. Kennedy, J. Eberhart, Particle swarm optimization, *Proceedings of The International Conference on IEEE*, Perth, Australia, 27 Nov-1 Dec, 1995.

[21] D. A. Coley, *An Introduction to genetic Algorithms for Scientists and Engineers* pp. 165-185, HongKong: World Scientific Publishing Co Inc, 1999.