

تشخیص آسیب سازه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل مصنوعی

سید امیر بنی مهد

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه اردکان

Banimahd@ardakan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰]

چکیده

در این پژوهش شناسایی محل و میزان آسیب در سازه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی بررسی شده است. تعیین میزان و محل خسارت در سازه‌ها با استفاده از بازرسی میدانی و چشمی فرآیندی پرهزینه است، پس با استفاده از روش‌های تحلیلی علاوه بر سرعت دسترسی قابل ملاحظه، هزینه‌های تعیین محل و میزان آسیب نیز کاهش می‌یابد. با دانستن فرکانس‌ها و شکل‌های مودی سازه آسیب‌دیده که از نتایج اندازه‌گیری بدست می‌آید و همچنین فرض عدم تغییر ماتریس جرم در سازه سالم و آسیب‌دیده، ماتریس سختی به گونه‌ای تعیین می‌شود که در قضیه مقادیر ویژه ماتریس جرم و سختی سازه آسیب‌دیده صدق نماید. حل مسأله از روش معکوس نیازمند سعی و خطای متعددی تا رسیدن به جواب قابل قبول است ولی استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی می‌تواند به گونه‌ای فضای پاسخ را جستجو کند که تعداد سعی‌های لازم بسیار کم و محدود شود. در این پژوهش الگوریتم زنبور عسل مصنوعی برای تعیین ماتریس سختی سازه آسیب‌دیده استفاده می‌شود. همچنین روش SEREP برای فشرده‌سازی ماتریس جرم و سختی به منظور کاهش حجم محاسبات استفاده شده است. برای ارزیابی این روش، دو خرابی مسطح و فضایی و یک قاب مسطح هر کدام با دو سناریوی خسارت در نظر گرفته شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که این روش توانایی و دقت قابل قبولی در تعیین میزان و محل آسیب در سازه با وجود اطلاعات فرکانسی و شکل مودی نویزدار دارد.

واژگان کلیدی: تشخیص خسارت، الگوریتم زنبور عسل مصنوعی، روش فشرده‌سازی SEREP.

۱- مقدمه

بهره‌برداری از جمله مسایلی است که در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب نموده است. از آنجایی که اندازه‌گیری مشخصات لرزه‌ای سازه می‌تواند با هزینه نسبتاً کم و پس از وقوع خسارت صورت پذیرد و نتایج آن نیز در پژوهش‌ها قابل قبول تشخیص داده شده است، تکنیک‌هایی که بر پایه اندازه‌گیری مشخصات لرزه‌ای استوار شده،

بروز خرابی یا خسارت در سازه‌های مهندسی ممکن است عملکرد آنها را دچار اختلال نماید. این خرابی‌ها ممکن است در اثر خوردگی، زنگ‌زدگی، خستگی و نظایر آن رخ دهد. بنابراین تشخیص خسارت و همچنین پایش سلامت سازه به منظور اطمینان از عملکرد مناسب در طول عمر مفید و درحین

حل مسأله بهینه‌سازی از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی، ABC، استفاده می‌شود که روشی با تعداد پارامترهای کتتری کم نسبت به سایر الگوریتم‌ها است و دقت و انعطاف‌پذیری آن در پژوهش‌های گذشته در حل مسایل بهینه‌سازی مورد تایید قرار گرفته است [17-22]. معمولاً مدل‌سازی سازه با روش اجزای محدود منجر به تولید ماتریس‌هایی می‌شود که حجم زیادی از حافظه را اشغال می‌کند، پس استفاده از تکنیک‌های فشرده‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. از بین روش‌های فشرده‌سازی مانند گویان¹ [23]، روش فشرده‌سازی دینامیکی² [24-26]، روش فشرده‌سازی هیبریدی³ [27,28] و⁴ SEREP [29-31] که به منظور کاهش حجم ماتریس‌های جرم و سختی سازه و کاهش حجم محاسبات معمول است، از روش SEREP در این مقاله استفاده شده است. با توجه به نتایج پژوهش‌ها دقت این روش به گونه‌ای است که می‌توان اطمینان داشت که فرکانس ارتعاشی و شکل مودی حالت فشرده ماتریس‌های جرم و سختی برابر با حالت غیرفشرده آن است. از آنجایی که ابعاد ماتریس جرم و سختی فشرده کاهش یافته است، پس حجم محاسبات برای رسیدن به فرکانس‌ها و شکل‌های مودی مدنظر مسأله بدون تغییر در دقت پاسخ‌ها، کاهش می‌یابد. در این مقاله از سه مثال عددی برای تشخیص خرابی در خرابی صفحه‌ای، خرابی فضایی و قاب دوطبقی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی برای تعیین محل و میزان خسارت انواع سازه‌ها حتی در صورت وجود نویز در اطلاعات ورودی منجر به جواب قابل قبول خواهد شد.

۲- تشریح مسأله

در این بخش، روش حل مسأله برای تشخیص خرابی سازه بیان می‌شود. واضح است که ایجاد خسارت در سازه باعث تغییر مشخصات دینامیکی از قبیل شکل مودی و فرکانس طبیعی آن می‌شود. بنابراین تابع هدف در این مقاله بر اساس

گسترش قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. خسارت در سازه منجر به تغییر مشخصات سختی سازه خواهد شد بنابراین مشخصات دینامیکی سازه نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. پس بررسی تغییرات پارامترهای دینامیکی سازه به منظور تعیین خسارت روشی مؤثر است. بسیاری از پژوهشگران تغییر در پارامترهای مودال سازه نظیر فرکانس طبیعی و بردارهای شکل مودی را مورد توجه قرار داده‌اند [1-6]. در این مقالات پژوهشگران از بررسی تفاوت بین مشخصات دینامیکی سازه آسیب‌دیده که از اندازه‌گیری بدست می‌آید و همچنین منظور نمودن مشخصات سازه سالم، میزان و محل خسارت را مورد مطالعه قرار می‌دهند. دشواری در جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تعیین خسارت در سازه‌های بزرگ مانند محدودیت در تعداد وسایل اندازه‌گیری، وجود خطاهای حین اندازه‌گیری، پژوهشگران را به استفاده از تکنیک‌هایی سوق داد که حساسیت کمی نسبت به تغییر نوع سازه دارد و در عین حال با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری محدود و نویزدار بتواند محل و میزان خسارت را به درستی تعیین نماید [7-8]. یکی از تکنیک‌های مؤثر عددی برای تعیین خسارت در سازه‌ها استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. با توجه به تعدد الگوریتم‌های عددی بهینه‌سازی، پژوهش‌های بسیاری در زمینه تشخیص خسارت با استفاده از این تکنیک‌ها گزارش شده است [9-13]. بنابراین در صورتی که بتوان تابع هدف مناسبی یافت که برای انواع سازه و با توجه به اطلاعات اندازه‌گیری نویزدار و محدود به جواب درست برسد و همچنین سرعت قابل قبولی در رسیدن به پاسخ داشته باشد، نیازهای مربوط به تشخیص خرابی یا پایش سلامت سازه مرتفع خواهد شد. روش المان محدود توسعه‌یافته نیز در زمینه ردیابی آسیب در سازه‌های مهندسی به کار گرفته شده است [14,15]. استفاده از این روش با توجه به عدم نیاز به مش‌بندی دوباره در هر تکرار به همراه بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات این امکان را فراهم نموده است که ردیابی ترک با محاسبات کمتری به نتیجه برسد [16]. در این مطالعه از اصل تعامد مودهای ارتعاشی و قضیه مقادیر ویژه برای تعریف تابع هدف استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان‌دهنده دقت و سرعت قابل قبول این تابع هدف در رسیدن به جواب نهایی است. برای

1. Guyan condensation

2. Dynamic condensation

3. Hybrid condensation

4. System equivalent reduction expansion process

φ_i^d ، است. ماتریس جرم نیز در دو سازه آسیب دیده و سالم بدون تغییر باقی می ماند. در این مطالعه از کاهش مدول الاستیسیته برای در نظر گرفتن خسارت در سازه استفاده می شود. اگر فرض کنیم که β_j شاخص خسارت زامین عضو سازه باشد آنگاه

$$E_j^d = (1 - \beta_j) E_j^h \quad (4)$$

که در این رابطه E_j^d و E_j^h به ترتیب مدول الاستیسیته زامین عضو سازه سالم و آسیب دیده می باشد. β عددی بین صفر و یک می باشد که عدد صفر بیانگر عدم خسارت و یک بیانگر خسارت کامل در عضو است. در سازه معین در صورتی که شاخص خسارت یکی از اعضا یک باشد، سازه ناپایدار می شود و تحلیل مقادیر ویژه آن امکان پذیر نیست. برای پرهیز از این مسئله، حد بالای شاخص خسارت همواره کمتر از یک منظور می شود. در مدل اجزای محدود، ماتریس سختی سازه از اسمبل کردن ماتریس سختی اعضای سازه بدست می آید. بنابراین ماتریس سختی سازه را می توان به شکل زیر ارایه نمود.

$$K^d = \sum_{j=1}^{me} K_j^d \quad (5)$$

که در این رابطه علامت Σ نشان دهنده اسمبل کردن اعضا بر اساس تعداد درجات آزادی، me تعداد اعضای سازه و K^d ماتریس سختی سازه آسیب دیده است. برای بیان ماتریس سختی بر اساس شاخص خسارت β ، از جایگذاری رابطه (۴) در رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$K^d = \sum_{j=1}^{me} (1 - \beta_j) K_j^h \quad (6)$$

از آنجایی که تعداد حسگرهای استفاده شده برای ثبت اطلاعات مربوط به مشخصات دینامیکی سازه معمولاً کمتر از درجات آزادی سازه مدل شده با روش اجزای محدود می باشد، پس روش فشرده سازی در این مطالعات مورد توجه قرار گرفت. با استفاده از روش فشرده سازی یک مدل به همراه تمامی درجات آزادی تبدیل به مدلی با تعداد درجات آزادی کمتر می شود در حالی که انتظار می رود مشخصات دینامیکی سیستم از قبیل فرکانس طبیعی و مودهای ارتعاشی آن تغییر نکند. هدف این است که با اطلاعات ناقص از مدل اجزای

اطلاعات شکل مودی و فرکانس سازه تعریف می شود. علت استفاده از این اطلاعات، دسترسی آسان و نسبتاً سریع از طریق پردازش پاسخ لرزه ای اندازه گیری شده در محل است. از آنجایی که هدف مسأله بررسی کارکرد صحیح روش تعیین خسارت سازه از روش بهینه سازی کلونی زنبور عسل است، در این پژوهش فرض شده که میزان خسارت و محل آسیب دیدگی در سازه مورد نظر مشخص است. بنابراین مشخصات دینامیکی، شامل فرکانس طبیعی و شکل مودی از طریق مدل سازی اجزای محدود سازه در دسترس است. همچنین فرض بر این است که بعد از وقوع خسارت، جرم سازه کم نمی شود یا تغییرات آن قابل چشم پوشی است. بنابراین می توان عملاً فرض نمود که ماتریس جرم سازه قبل و بعد از خسارت بدون تغییر باقی خواهد ماند. معادله حرکت دینامیکی برای سازه ای با میرایی صفر ($C=0$) به شکل زیر است.

$$M \ddot{x} + Kx = 0 \quad (1)$$

که در این معادله M و K به ترتیب ماتریس جرم و سختی سازه چند درجه آزادی، بردارهای x و \ddot{x} به ترتیب بردار تغییر مکان و شتاب است. در مدل سازی ماتریس جرم از مدل جرم سازگار استفاده شده است. اگر تعداد درجات آزادی سیستم دینامیکی فوق را N در نظر بگیریم، رابطه (۱) را می توان به صورت N معادله درگیر (وابسته) بازنویسی نمود. از تحلیل مقادیر ویژه دستگاه معادلات مذکور رابطه بین شکل مودی و فرکانس های ارتعاشی به شکل زیر برای سازه سالم بدست می آید.

$$\{K^h - (\omega_i^h)^2 M\} \varphi_i^h = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

که در رابطه فوق K^h ماتریس سختی سازه سالم و ω_i^h فرکانس طبیعی سازه بر اساس شکل مودی i ام سازه سالم، φ_i^h است. در صورتی که این رابطه برای سازه آسیب دیده بازنویسی شود خواهیم داشت

$$\{K^d - (\omega_i^d)^2 M\} \varphi_i^d = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

که در این رابطه K^d ماتریس سختی آسیب دیده، ω_i^d فرکانس طبیعی سازه بر اساس شکل مودی i ام سازه آسیب دیده و

در روابط فوق ea و em به ترتیب اندیس آخرین مولفه بردار Aset و Mset است. بنابراین ماتریس U_n به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$U_n = \begin{Bmatrix} \varphi_{1,a_{m_1}} & \varphi_{1,a_{m_2}} & \cdots & \varphi_{1,a_{m_{em}}} \\ \varphi_{2,a_{m_1}} & \varphi_{2,a_{m_2}} & \cdots & \varphi_{2,a_{m_{em}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n,a_{m_1}} & \varphi_{n,a_{m_2}} & \cdots & \varphi_{n,a_{m_{em}}} \end{Bmatrix}$$

چنانچه از ماتریس U_n سطرهای متناظر با بردار Aset انتخاب شود، ماتریس U_a حاصل می‌شود.

$$U_a = \begin{Bmatrix} \varphi_{a_1,a_{m_1}} & \varphi_{a_1,a_{m_2}} & \cdots & \varphi_{a_1,a_{m_{ea}}} \\ \varphi_{a_2,a_{m_1}} & \varphi_{a_2,a_{m_2}} & \cdots & \varphi_{a_2,a_{m_{ea}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{a_{ea},a_{m_1}} & \varphi_{a_{ea},a_{m_2}} & \cdots & \varphi_{a_{ea},a_{m_{ea}}} \end{Bmatrix}$$

بر اساس فرآیند فشرده‌سازی SEREP، سباز بردار Aset همواره بزرگتر مساوی سباز بردار Mset است. با جایگزینی رابطه (۸) در رابطه (۷) و پیش‌ضرب T_u^T در رابطه بدست آمده، فرم فشرده معادله حرکت حاصل می‌شود.

$$M_{con} \ddot{x} + K_{con}^d x = 0 \quad (10)$$

که در این رابطه M_{con} و K_{con}^d به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی سازه آسیب‌دیده فشرده بر اساس درجات آزادی فعال است.

$$K_{con}^d = T_u^T K^d T_u \quad M_{con} = T_u^T M T_u \quad (11)$$

تحلیل مقادیر ویژه بر اساس دو ماتریس M_{con} و K_{con}^d با توجه به اطلاعات محدودی که از حسگرها وجود دارد، فرکانس‌های ارتعاشی و شکل مودی سازه آسیب‌دیده را به شرح زیر مشخص می‌کند.

$$\left\{ K_{con}^d - (\omega_{i,con}^d)^2 M_{con} \right\} \varphi_{i,con}^d = 0 \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

در روش SEREP فرکانس ارتعاشی و شکل مودی ماتریس‌های جرم و سختی فشرده سازه‌ی آسیب‌دیده بر اساس رابطه (۱۲) برابر با حالت غیرفشرده آن است [29-31]. با توجه به کاهش ابعاد ماتریس جرم و سختی حجم محاسبات

محدود، مشخصات دینامیکی سازه اصلی را نتیجه گرفت. برخی از مدل‌های فشرده‌سازی عبارت است از روش گویان [23]، روش فشرده‌سازی دینامیکی [24-26]، روش فشرده‌سازی هیبریدی [27,28] و SEREP [29-31]. در روش فشرده‌سازی گویان، دینامیکی و هیبریدی فرکانس‌های محاسبه‌شده سازه فشرده متفاوت از سازه اصلی است و این اختلاف در موده‌های بالاتر بیشتر مشهود است، درحالی‌که با استفاده از روش SEREP فرکانس‌های محاسبه‌شده مساوی با سازه اصلی است و اختلافی مشاهده نمی‌شود [31]. پس در این مطالعه از روش SEREP برای فشرده‌سازی و استفاده از اطلاعات ناقص برای محاسبه فرکانس سازه اصلی استفاده می‌شود. مانند دیگر روش‌های فشرده‌سازی در این روش نیز ماتریس جرم، سختی، بردارهای تغییرمکان و شتاب سازه به دو بخش درجه آزادی اصلی و فرعی (فعال و غیرفعال) تقسیم‌بندی می‌شود. بنابراین معادله حرکت سیستم دینامیکی نامیرا به شکل زیر قابل ارایه است:

$$\begin{bmatrix} M_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_m \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (V)$$

در این رابطه زیرنویس m و s به ترتیب اشاره به درجات آزادی اصلی و فرعی دارند و x و \ddot{x} به ترتیب نشان‌دهنده بردار تغییرمکان و شتاب است. از آنجایی که حسگرهای اندازه‌گیری در تمام درجات آزادی سازه نصب نمی‌شود اطلاعات قسمتهایی از سازه حذف می‌شود. برای این منظور معادله حرکت سازه به گونه‌ای فرمول‌بندی می‌شود که زیرنویس s در نظر گرفته نشود. پس رابطه بین بردار تغییرمکان سازه و قسمت فعال آن به شرح زیر منظور می‌شود.

$$\{x\} = [x_m \quad x_s]^T = [T_u] \{x_m\} \quad (8)$$

که در این رابطه T_u عبارت است از

$$T_u = [U_n] (U_a^T U_a)^{-1} U_a^T \quad (9)$$

بر اساس تکنیک SEREP چنانچه Aset و Mset به ترتیب بردار درجات آزادی فعال سازه و بردار درجات آزادی انتخاب شده برای فرآیند روش SEREP باشد، آنگاه U_n ماتریسی است که ستون‌های آن ستون‌های ماتریس شکل مودی متناظر با بردار Mset است.

$$Aset = [a_1 \quad \dots \quad a_{ea}], Mset = [m_1 \quad \dots \quad m_{em}].$$

صرف هزینه کمتر می توان به جواب قابل قبول رسید. بنابراین تابع هدف در الگوریتم بهینه سازی به فرم زیر تعریف می شود.

$$F(\beta) = \left\{ K_{con}^d - (\omega_{i,con}^d)^2 M_{con} \right\} \varphi_{i,con}^d \quad (13)$$

$$i=1,2,\dots,N \quad \beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{me}]$$

β برداری است که میزان خسارت اعضا را نشان می دهد. در رابطه (۱۳) چنانچه مقادیر β به درستی و بر اساس خسارت واقعی تعیین شوند، تابع $F(\beta)$ صفر می شود. برای منظور نمودن خطاهای احتمالی که حین اندازه گیری بوجود می آید فرض می کنیم که بردار شکل مودی نویزدار باشد. بدین منظور بردار شکل مودی نویزدار به فرم زیر بیان می شود.

$$\varphi_i^{noisy} = \varphi_i (1 + NL \times \text{rand}[-1 \ 1]) \quad i=1,2,\dots,N \quad (14)$$

که در این رابطه φ_i و φ_i^{noisy} به ترتیب i امین بردار شکل مودی بدون نویز و نویزدار است. NL درصد نویز است که تابعی از دقت اندازه گیری و حسگرها است. $\text{rand}[-1 \ 1]$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده -1 تا 1 است [33]. از آنجایی که مقدار β به عنوان مجهول مسأله است می توان با سعی و خطا به جواب نزدیک شود. تابعی مانند $F(\beta)$ شامل تعداد قابل توجهی مینیمم نسبی و یک مینیمم مطلق است، بنابراین الگوریتمی که بتواند مقدار مینیمم مطلق تابع هدف $F(\beta)$ را از بین مینیمم های نسبی پیدا نماید، در این پژوهش اهمیت پیدا می کند. یکی از الگوریتم های بهینه سازی که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی است که در این مقاله نیز با توجه به ویژگی های مناسب همگرایی و سرعت قابل قبول و همچنین تعداد کم پارامترهای کنترلی، مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- بهینه سازی با الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

برای حل مسایلی با رویکرد تحلیل معکوس مانند مسأله تشخیص خرابی سازه می توان از تکنیک های عددی بهینه سازی سود جست. پژوهشگران علوم طبیعی در سال های اخیر با توجه به رفتار جمعی برخی حیوانات دریافته اند که عملکرد گروهی آنها توانسته راهکاری هوشمندانه و

برای رسیدن به فرکانس ها و شکل های مودی مدنظر مسأله بدون تغییر در دقت پاسخ ها، کاهش می یابد. همان گونه که پیشتر به آن اشاره شد بردارهای مودی و فرکانس های ارتعاشی سازه آسیب دیده بر اساس نتایج اندازه گیری مشخص است. در این مقاله فرض بر این است که ماتریس جرم و سختی سازه قبل از آسیب مشخص است. از آنجایی که ماتریس جرم سازه قبل و بعد از ترک خوردن تغییرات ناچیزی دارد می توان از این تغییرات چشم پوشی نمود. پس M_{con} یا ماتریس جرم سازه فشرده نیز از معلومات مسأله است. ذکر این نکته ضروری است که استفاده از اطلاعات ناقص مودال به منظور تعیین خسارت فقط برای سازه هایی که اندرکنش بین درجات آزادی سازه کوچک باشد منجر به جواب خواهد شد. در صورتی که سازه دارای درجات آزادی همبسته باشد جواب های قابل قبولی حاصل نمی شود [32]. در این پژوهش فرض بر این است که تمامی اطلاعات مربوط به درجات آزادی سازه در دسترس است و برای کاهش حجم محاسبات تعداد کمتری مود برای محاسبات استفاده شده است ($M_{set} < A_{set}$).

تعیین میزان خسارت و محل آن با روش های معمولی مانند بازرسی چشمی کاری سخت و زمان بر است. بسیاری از سازه ها نیز به بازرسی و مراقبت لحظه ای برای حفظ کاربری خود نیاز دارند، بنابراین استفاده از تکنیکی که بتواند به سرعت محل و میزان آسیب را مشخص نماید امری حیاتی است. بنابراین هدف اصلی، محاسبه دقیق ماتریس سختی سازه در هر لحظه به ویژه بعد از آسیب احتمالی است. یک راه حل این است که ماتریس K_{con}^d به گونه ای تعیین شود که در رابطه (۱۲) صدق کند. با در نظر گرفتن شاخص خسارت هر عضو یعنی β_j در ماتریس سختی اجزای سازه و جایگذاری در رابطه (۱۲)، یک چند جمله ای شامل متغیرهای β_j که z نماینده زامین عضو سازه است حاصل می شود. حل چنین معادلاتی برای تعیین میزان و محل خسارت با روش های مستقیم می تواند بسیار پرهزینه و پیچیده باشد، در حالی که اگر این رابطه به صورت یک مسأله بهینه سازی در نظر گرفته شود با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی با

پایه‌ریزی و ارایه شد [17] و اصلاحاتی نیز در ادامه روی آن صورت پذیرفت [18-22]. در این روش که بر اساس رفتار جمعی هوشمندانه زنبور عسل برای یافتن شهد گلها است، زنبورها به سه گروه کارگر، تماشاگر و پیشاهنگ تقسیم می‌شوند. هر زنبوری که به جستجوی غذا می‌رود یک کارگر محسوب می‌شود.

تماشاگران در کندو منتظر می‌مانند تا اطلاعاتی که زنبور کارگر در مورد غذا به کندو آورده است را دریافت نماید تا در جستجوی آتی مورد استفاده قرار دهد. زنبور پیشاهنگ نیز جز دسته‌ای است که فضای اطراف کندو را به صورت اتفاقی برای یافتن شهد می‌کاود. هر منبع غذایی به عنوان یک جواب برای حل مسأله بهینه‌سازی مدنظر قرار می‌گیرد. میزان کیفیت این جواب بر اساس مقدار شهدی که در منبع غذایی وجود دارد ارزیابی می‌شود. در روش بهینه‌سازی زنبور عسل، نیمی از زنبورها کارگر فرض می‌شوند و به دنبال غذا می‌روند. همچنین فرض بر این است که تعداد منابع غذایی با تعداد زنبورهای کارگر یکسان است. در صورتی که کیفیت منبع غذایی بعد از چندین تلاش مناسب تشخیص داده نشود آن منبع در جستجوهای بعدی حذف می‌شود و زنبور کارگر به یک پیشاهنگ تبدیل شده، فضای اتفاقی جدیدی را جستجو می‌نماید. مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی، روش ABC نیز بر اساس تکرار استوار است. با توجه به الگوریتم زنبور عسل سه پارامتر مورد نیاز عبارتند از: الف- تعداد جمعیت اولیه (دوبرابر تعداد منابع غذایی). ب- پارامتر محدودکننده جستجو در صورتی که کیفیت پاسخ بهبود نیابد. پ- محدودیت بیشینه تعداد محاسبات ماکزیمم. اگر فرض کنیم که تعداد منابع غذایی NF باشد به همین تعداد نیز باید زنبور کارگر یا پیشاهنگ که نصف جمعیت کندو نیز هست در نظر گرفته شود. در مسأله مورد نظر این تحقیق که تشخیص خرابی سازه می‌باشد، هدف رسیدن به مقدار صحیح بردار β می‌باشد. در صورتی که D طول بردار جواب (تعداد اعضای سازه) باشد، NF نیز تعداد جمعیتی است که هربار فضای پاسخ را برای جواب بهینه می‌جوید. فرآیند تکراری الگوریتم زنبور عسل تا رسیدن به پاسخ بهینه را می‌توان به شرح زیر بیان نمود.

کم‌هزینه‌ای برای یافتن مسیر یا غذا در اختیارشان قرار دهد. بر همین اساس پژوهشگران علوم مهندسی و ریاضیات با الهام از همین رفتار جمعی، روش‌های عددی بهینه‌سازی را گسترش داده‌اند که می‌تواند در حل مسایل بهینه‌سازی پیچیده و پرهزینه مورد استفاده قرار گیرد. از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها می‌توان به الگوریتم کلونی مورچگان^۵، الگوریتم ژنتیک^۶، الگوریتم زنبور عسل^۷ و نظایر آن اشاره کرد. هر کدام از این روش‌ها در مطالعات متعددی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است اما تاکنون پیشنهاد قطعی در مورد برتری مطلق یکی از این روش‌ها نشده است، زیرا سرعت یافتن پاسخ و همگرایی به جواب با توجه به نوع مسأله برای هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متفاوت است. در این مطالعه الگوریتم کلونی زنبور عسل در حل مسأله بهینه‌سازی یعنی یافتن محل و میزان خرابی سازه مدنظر قرار گرفته است. علت استفاده از این الگوریتم تعداد پارامترهای کنترلی کمتر نسبت با سایر الگوریتم‌ها است. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک علاوه بر پارامترهای عمومی اندازه جمعیت و محدودیت تعداد محاسبات ماکزیمم، سه پارامتر کنترلی دیگر یعنی نرخ تزویج، نرخ جهش و شکاف نسلی نیز وجود دارد. در روش تجمع ذرات نیز پارامترهای کنترلی فاکتور شناختی، فاکتور جمعی و وزن اینرسی مازاد بر دو پارامتر عمومی هستند که قبل از اجرای برنامه باید تعیین شود. در سایر الگوریتم‌ها نیز این نقطه ضعف کم و بیش به چشم می‌خورد. در الگوریتم زنبور عسل بجز دو پارامتر عمومی تنها یک پارامتر کنترلی دیگر وجود دارد. این پارامتر که محدودیت به پایان‌رسانی الگوریتم را تعیین می‌کند تعداد تلاش‌هایی است که در پاسخ‌ها بهبودی حاصل نگردد و پس از تعداد تکرار مشخص شده جستجو متوقف شود. بنابراین در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، الگوریتم زنبور عسل ساده و انعطاف‌پذیر است. الگوریتم زنبور عسل مصنوعی نخستین بار توسط کارابوگا در سال ۲۰۰۵ برای حل مسأله بهینه‌سازی

5. Ant colony
6. Genetic algorithm
7. Artificial bee colony

۵- در این مرحله جمعیت جدید زنبورهای کارگر بر اساس رابطه (۱۶) و بر اساس کیفیت منبع غذایی بدست آمده در مرحله قبل از کندو خارج می شود و بر اساس معیار ارزیابی شده در مرحله سوم نسبت به انتخاب منبع جدید یا ادامه کار با همان منابع قدیم تصمیم گیری خواهد نمود.

۶- چنانچه کیفیت منبع غذایی بعد از چندین تکرار مشخص بهبود نیافت، این منبع به عنوان منبع بی ارزش از دور خارج خواهد شد و منبع جدید بر اساس رابطه (۱۵) جایگزین می شود و زنبورهای پیشاهنگ شروع به جستجوی نقطه دیگری خواهند نمود.

۷- چنانچه فرآیند جستجو بر اساس محدودیت مشخص شده به انتهای خود رسیده باشد، بهترین جواب گزارش می شود، در غیر این صورت الگوریتم به مرحله دوم می رسد. رابطه ای برای تعیین پارامتر محدودکننده (MCN) توسط کارابوگا و همکاران [19] پیشنهاد شده است که حاصل ضرب تعداد منابع غذا در طول بردار پاسخ $(MCN = NF \times D)$ است.

با استفاده از روش ABC انتظار می رود شاخص های خسارت اعضا به گونه ای تعیین شود که بردار $F(\beta)$ را کمینه نماید. به عبارت دیگر بردار $\beta^T = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{me})$ به گونه ای باشد که $F(\beta)$ کمترین شود.

۴- نمونه های عددی

در این بخش کارایی و دقت الگوریتم زنبور عسل برای حل مسایل بهینه سازی یافتن خسارت در سازه با استفاده از سه نمونه بررسی می شود: خرابی دویعدی با ۳۱ المان، خرابی سه بعدی با ۲۵ المان و قاب دویعدی با ۱۰ المان، هرکدام با دو سناریوی خسارت. کد کامپیوتری در نرم افزار متلب بر اساس الگوریتم زنبور عسل گسترش داده می شوند و با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه، فرکانس های سازه سالم و آسیب دیده به عنوان ورودی به الگوریتم زنبور عسل مصنوعی مورد استفاده قرار می گیرد. معمولاً جمعیت کلونی کمینه دو برابر پارامترهای هر مساله منظور می شود. بنابراین تعداد زنبورهای نمونه عددی اول تا سوم به ترتیب ۵۰، ۷۰ و ۲۰ منظور می شود. تعداد بیشینه تلاش های زنبورهای کارگر که منجر به

۱- جمعیت اولیه $(X_1, X_2, \dots, X_{NF})$ برای جستجوی اولیه و تصادفی تشکیل می شود بطوری که هریک از مولفه های آن بردار احتمالی پاسخ مسأله یعنی $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ می باشد که مولفه های آن از رابطه زیر تعیین می گردند.

$$X_{ij} = X_{minj} + \text{rand}[0, 1](X_{maxj} - X_{minj}) \quad (15)$$

$$j = 1, 2, \dots, D \quad i = 1, 2, \dots, NF$$

$\text{rand}[0, 1]$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده صفر تا یک است. X_{minj} و X_{maxj} کران های بالا و پایین جواب های مسأله هستند که در مسأله حاضر مقدار صفر یعنی عضو بدون خرابی و مقدار یک به معنای خرابی کامل است. به منظور جلوگیری از واگرا شدن جواب به واسطه ناپایداری سازه مقدار کران بالا همواره کوچک تر از یک منظور می شود. پس از تولید جمعیت اولیه کیفیت هر منبع غذایی محاسبه می شود.

۲- هر زنبور کارگر، همسایگی منبع غذایی یافت شده را برای یافتن منبع غذایی جدید با استفاده از رابطه زیر جستجو می نماید.

$$X_{ij}^{new} = X_{ij} + \varphi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \quad (16)$$

$$j = 1, 2, \dots, D \quad k = 1, 2, \dots, NF \quad j \neq k$$

φ_{ij} تابعی تصادفی در بازه بین -۱ تا ۱ و با توزیع یکنواخت می باشد.

۳- بعد از حرکت به سمت منبع غذایی جدید که در همسایگی منبع قدیمی قرار گرفته اند، چنانچه کیفیتی مساوی یا بهتر نسبت به منبع قبلی برآورد گردد، منبع جدید جایگزین منبع قدیمی می گردد.

۴- پس از اتمام جستجو احتمال هریک از پاسخ ها با استفاده از روابط زیر محاسبه می شود.

$$P_i = \text{Fit}_i / \sum_{n=1}^{NF} \text{Fit}_n \quad (17)$$

که در این رابطه کیفیت منبع غذایی، Fit_i ، با رابطه زیر تعریف می شود.

$$\text{Fit}_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & f_i \geq 0 \\ 1+|f_i| & f_i < 0 \end{cases} \quad (18)$$

f_i مقدار تابع هدف برای منبع غذایی i ام می باشد.

با استفاده از رابطه (۱۴) در فرکانس‌های محاسبه شده اعمال می‌شود.

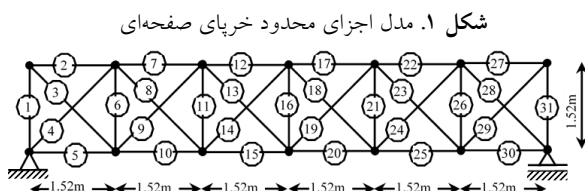


Fig. 1. Finite element model of the plane truss

شکل ۲. نتایج همگرایی پاسخ الگوریتم زنبور عسل مصنوعی در خرابی صفحه‌ای

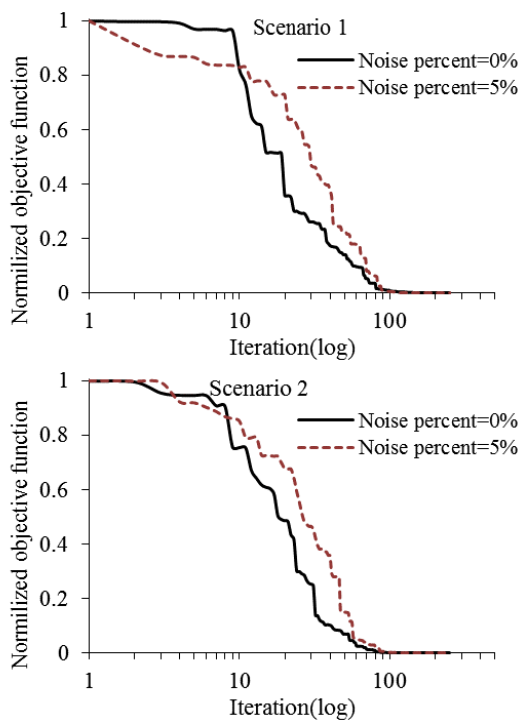


Fig. 2. The convergence of the ABC method for the plane truss

این نتیجه از ضرب تابع یکنواخت تولید نویز در فرکانس اصلی بدون نویز بدست می‌آید. همگرایی نتایج با استفاده از ۷۰ زنبور مصنوعی در شکل (۲) ارائه شده که نشان‌دهنده همگرایی نتایج با حدود ۲۵۰ تکرار است. همچنین سرعت همگرایی در حالت بدون نویز بیشتر از حالت نویزدار می‌باشد. در شکل (۳) نتایج تعیین خسارت خرابی دوبعدی بر اساس دو سناریو خسارت بعد از ۱۵۰ تکرار نشان داده شده است و نمایانگر نتایج قابل قبول در تعیین محل و میزان خسارت می‌باشد. در صورتی که نویز در تحلیل وارد شود، نتایج بدست‌آمده دارای خطای ناچیزی است که می‌توان از

نتیجه بهتری نشود به عنوان محدودیت الگوریتم معرفی می‌شود. با توجه به تحلیل انجام شده مشخص می‌شود که محدودیت ۱۰۰ تکرار عددی مناسب است و در هیچ یک از اجراها، برنامه بر اساس عدد محدودیت متوقف نخواهد شد. محدودیت مدنظر در مواردی که ابعاد سازه بزرگ باشد می‌تواند از تکرارهای بی‌اثر بکاهد که نتیجه آن سرعت بیشتر در رسیدن به پاسخ نهایی است. پیشنهاد ارائه شده برای تعداد تکرارها در الگوریتم زنبور عسل $(MCN=NF \times D)$ عددی بزرگ برای این نمونه بود، پس با توجه به همگرایی پاسخ‌ها این عدد بعد از چند تحلیل به ۲۵۰ تقلیل یافت.

مطابق الگوریتم زنبور عسل مصنوعی، محاسبه تابع هدف در هر گام تحلیل برابر با تعداد کلونی زنبور عسل یا دو برابر تعداد منابع غذایی است. بنابراین تعداد تحلیل‌های مقادیر ویژه که در تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته برای نمونه‌های اول تا سوم به ترتیب ۷۰، ۵۰ و ۲۰ بار است. از آنجایی که این فرآیند ۲۵۰ بار تکرار می‌شود پس تعداد محاسبات مقادیر ویژه سازه برای نمونه‌های مذکور به ترتیب ۱۷۵۰۰، ۱۲۵۰۰ و ۵۰۰۰ است.

۱-۴- خرابی دوبعدی با ۳۱ المان

خرابی دوبعدی که در شکل (۱) نشان داده شده است یک مدل اجزای محدود با ۳۱ المان می‌باشد. ماتریس سختی و جرم سازگار برای محاسبه فرکانس ارتعاشی سازه با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصالح مورد استفاده آلومینیوم با مدول الاستیسیته $E=0.71 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و وزن واحد حجم $\gamma=2810 \text{ kg/m}^3$ است. مساحت مقطع $A=25 \text{ cm}^2$ است. با توجه به در نظر گرفتن دو درجه آزادی برای هر گره و شرایط تکیه‌گاهی، تعداد درجات آزادی ۲۵ است. دو سناریوی خسارت بر اساس کاهش سختی محوری معرفی می‌شود. برای سناریوی اول در المان‌های شماره ۳ و ۲۹ به ترتیب ۴۰ و ۲۵ درصد و برای سناریوی دوم در المان‌های شماره ۵، ۱۷، ۲۱ و ۲۹ به ترتیب ۳۰، ۱۵، ۱۰ و ۳۳ درصد کاهش سختی محوری در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی شرایط واقعی اطلاعات ثبت شده مربوط به فرکانس سازه که بعضاً ممکن است با نویز همراه باشد، ۵ درصد نویز

ماتریس جرم و سختی بدست می‌آید. شکل (۵) همگرایی نتایج با استفاده از ۵۰ زنبورعسل مصنوعی را بعد از حدود ۲۵۰ تکرار نشان می‌دهد. با استفاده از الگوریتم زنبورعسل و مقایسه شکل (۶) برای حالت نویزدار و بدون نویز فرکانس و مطابق این شکل با چشم‌پوشی کردن از خطاهای ناچیز در حالت فرکانس‌های نویزدار می‌توان خسارت در سازه را با روش ارایه شده به درستی تشخیص داد.

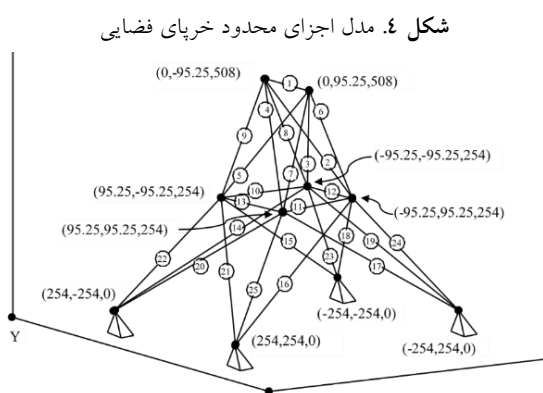


Fig. 4. Finite element model of the space truss

شکل ۵. نتایج همگرایی پاسخ الگوریتم زنبورعسل مصنوعی در خرابی فضایی

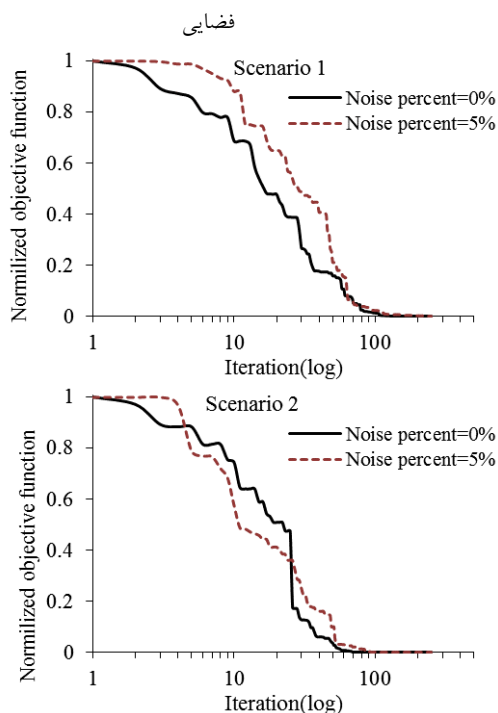


Fig. 5. The convergence of the ABC method for the space truss

آنها چشم‌پوشی نمود. از آنجایی که در روش ABC نصف کل جمعیت کندو به جستجوی غذا می‌رود، بنابراین جمعیت زنبورها بیشتر از دو برابر المان‌های سازه یعنی ۷۰ زنبور منظور شده است. این روند برای مسایل بعدی نیز لحاظ شده است.

شکل ۳. نتایج تعیین خسارت در خرابی صفحه‌ای

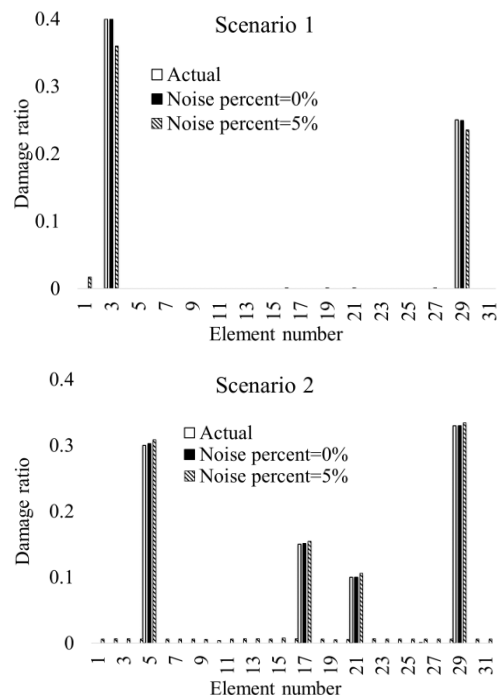


Fig. 3. The result of damage detection in the plane truss

۲-۴- خرابی سه بعدی با ۲۵ المان

خرابی سه بعدی با ۲۵ المان به همراه مختصات گره‌های آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در مدل اجزای محدود هر گره شامل سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد. مصالح مورد استفاده فولاد با مدول الاستیسیته $E=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و وزن واحد حجم $\gamma=7800 \text{ kg/m}^3$ و مساحت تمامی اعضا $A=75 \text{ cm}^2$ است. دو سناریوی خسارت برای بررسی قابلیت و درستی روش ارایه شده در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول المان‌های شماره ۳، ۱۶ و ۲۵ به ترتیب ۳۵، ۵۰ درصد و در سناریوی دوم المان شماره ۱۹ به میزان ۴۰ درصد کاهش سختی محوری به عنوان خسارت سازه‌ای معرفی شده است. با توجه به درجات آزادی این سازه، جمعا ۱۸ فرکانس ارتعاشی مستقل براساس تحلیل مقادیر ویژه

۳-۴- قاب صفحه‌ای دو طبقه

مدل اجزای محدود یک قاب دو بعدی با ۱۰ عضو و ۹ گره در شکل (۷) نشان داده شده است. این قاب شامل ستون از نوع 2IPE140 و تیر از نوع IPE160 می‌باشد. مصالح مورد استفاده از نوع فولاد با مدول الاستیسیته $E=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و وزن واحد حجم $\gamma=7800 \text{ kg/m}^3$ است. هر گره شامل دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی است. برای سناریوی اول در المان‌های شماره ۱، ۲ و ۱۰ به ترتیب ۵۰، ۳۰ و ۳۵ درصد و برای سناریوی دوم در المان شماره ۸ به میزان ۴۲ درصد کاهش سختی خمشی در نظر گرفته شد. نتایج تعیین خسارت در دو سناریوی مختلف به صورت نوین‌دار و بدون نوین در نظر گرفته شده است. در شکل (۸) همگرایی الگوریتم مذکور با استفاده از ۲۰ زنبور عسل مصنوعی بعد از ۲۵۰ تکرار را نشان می‌دهد که سرعت قابل قبولی است. کارایی الگوریتم زنبور عسل در تعیین خسارت با توجه به چشم‌پوشی کردن از خطاهای جزئی مربوط به حالت نوین‌دار در شکل (۹) مشخص است.

شکل ۶. نتایج مربوط به تعیین خسارت در خرابی فضایی

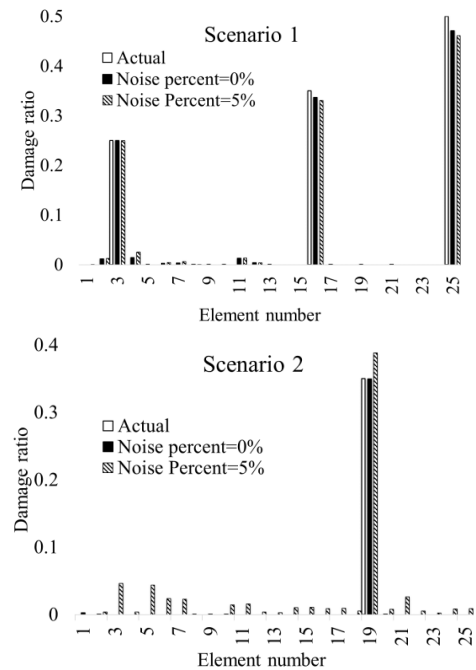


Fig. 6. The result of damage detection in the space truss

شکل ۷. مدل اجزای محدود قاب صفحه‌ای

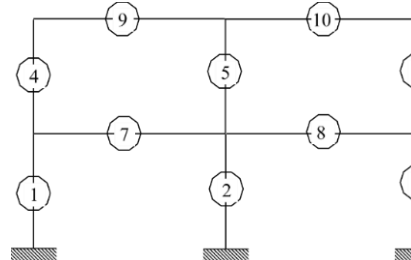


Fig. 7. Finite element model of the plane frame

شکل ۹. نتایج مربوط به تعیین خسارت در قاب صفحه‌ای

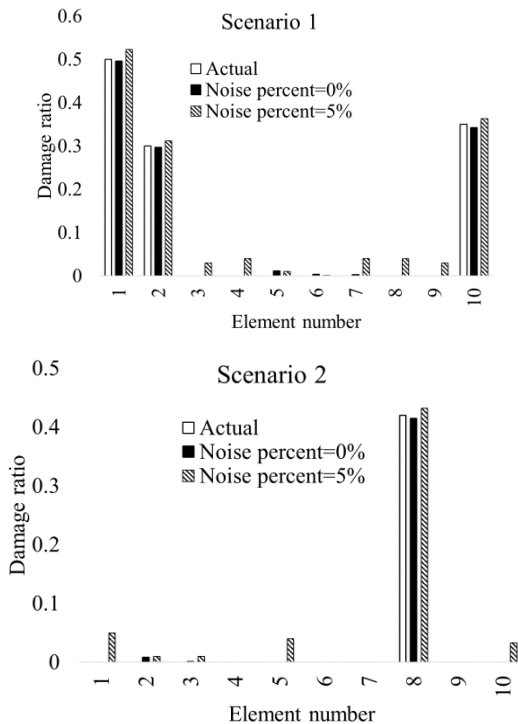


Fig. 9. The result of damage detection in the plane frame

شکل ۸. نتایج همگرایی پاسخ الگوریتم زنبور عسل مصنوعی در قاب

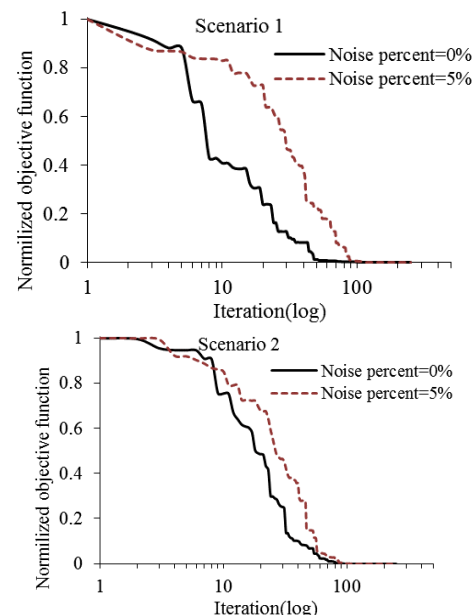


Fig. 8. The convergence of the ABC method for the plane frame

۵- نتیجه گیری

در این مقاله کارایی الگوریتم بهینه‌سازی زنبورعسل مصنوعی برای تعیین محل و میزان خسارت سازه‌ها بررسی شده است. هدف از این پژوهش مشخص نمودن عضو یا المانی است که دچار کاهش سختی محوری یا خمشی شده است. بدین منظور از تحلیل مقادیر ویژه ماتریس جرم و سختی برای محاسبه فرکانس‌های سازه استفاده شد. با توجه به عدم تغییر در ماتریس جرم سازه سالم و آسیب‌دیده و استفاده از فرکانس‌ها و بردارهای ویژه سازه، که در عمل از اندازه‌گیری‌های میدانی بدست می‌آید، تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی تعریف شد. به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی برداشت اطلاعات میدانی، نویز نیز در داده‌های تحلیلی اضافه شد. همچنین برای افزایش سرعت محاسبات از روش فشرده‌سازی SEREP با استفاده از تعداد مودهای کمتر استفاده شد. برای نشان دادن درستی عملکرد و کارایی این روش از سه نمونه تحلیلی شامل خرپای صفحه‌ای و فضایی و قاب صفحه‌ای با رویکرد فرآیند معکوس یعنی در نظر گرفتن سناریوی خسارت از پیش تعیین شده و یافتن میزان و محل آسیب با استفاده از روش بهینه‌سازی زنبورعسل مصنوعی استفاده شد. نتایج بیانگر این موضوع بودند که این روش می‌تواند برای تعیین محل و میزان آسیب حتی در شرایط اطلاعات نوبت‌دار موفق عمل نماید.

References

۶- مراجع

- Detection Using Dynamic Properties Determined from Laboratory and Field Testing. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **22**(4), 238-244.
- [6] Ghodrati Amiri G., Hosseinzadeh A. Z., Bagheri A. & Koo, K.-Y. 2013 Damage prognosis by means of modal residual force and static deflections obtained by modal flexibility based on the diagonalization method. *Smart Materials and Structures*, **22**(7), 75032.
- [7] Shi Z. Y., Law S. S. & Zhang, L. M. 2000 Structural Damage Detection from Modal Strain Energy Change. *Journal of Engineering Mechanics*, **126**(12), 1216-1223.
- [8] Bicanic N. & Chen, H. P. 1997 Damage identification in framed structures using natural frequencies. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **40**(23), 4451-4468.
- [9] Rasouli A., Ghodrati Amiri G., Kheyroddin A., Ghafory-Ashtiany M. & Kourehli, S. S. 2014 A new method for damage prognosis based on incomplete modal data via an evolutionary algorithm. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **18**(3), 253-270.
- [10] Seyedpoor S. M. 2012 International Journal of Non-Linear Mechanics A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **47**(1), 1-8.
- [11] Kourehli S. S., Bagheri A., Amiri G. G. & Ghafory-ashtiany, M. 2013 Structural Damage Detection Using Incomplete Modal Data and Incomplete Static Response, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **17**(1), 216-223.
- [12] Mehrjoo M., Khaji N. & Ghafory-ashtiany M. 2013 Application of genetic algorithm in crack detection of beam-like structures using a new cracked Euler - Bernoulli beam element. *Applied Soft Computing Journal*, **13**(2), 867-880.
- [13] Mehrjoo M., Khaji N. & Ghafory-Ashtiany M. 2013 New Timoshenko-cracked beam element and crack detection in beam-like structures using genetic algorithm. *Inverse Problems in Science and Engineering*, **22**(3), 359-382.
- [14] Yan G., Sun H. & Waisman H. 2015 A guided Bayesian inference approach for detection of multiple flaws in structures using the extended finite element method. *Computers and Structures* **152**, 27-44.
- [15] Nanthakumar S., Lahmer T. & Rabczuk T. 2014 Detection of multiple flaws in piezoelectric structures using XFEM and level sets. *Computer Methods in applied Mechanics and engineering*, **275**, 98-112.
- [16] Livani M.A., Khaji N. & Zakian P. 2017 Damage identification of crcks in structures via extended finite element method and particle swarm optimization. *Modares Civil Engineering journal*, **16**(5), 177-189. (In Persian)
- [1] Law S. S., Chan T. H. T. & Wu D. 2001 Efficient numerical model for the damage detection of large- scale engineering structures. *Engineering Structures*, **23**(5), 436-451.
- [2] Kim J. T., Ryu Y. S., Cho H. M. & Stubbs N. 2003 Damage identification in beam-type structures: Frequency-based method vs mode-shape-based method. *Engineering Structures*, **25**(1), 57-67.
- [3] Ghodrati Amiri G., Seyed Razzaghi S. A. & Bagheri, A. 2011 Damage detection in plates based on pattern search and Genetic algorithms. *Smart Structures and Systems*, **7**(2), 117-132.
- [4] Chen H. P. 2005 Nonlinear Perturbation Theory for Structural Dynamic Systems. *AIAA Journal*, **43**(11), 2412-2421.
- [5] Hsieh K. H., Halling M. W., Barr P. J. & Robinson, M. J. 2008 Structural Damage

- [25] Paz M. 1984 Dynamic Condensation. *AIAA Journal*, **22**(5), 724-727.
- [26] Flax A. 1985 Comment on Dynamic Condensation. *AIAA Journal* **23**(11), 1841-1843.
- [27] Kim Ki-Ook. 1995 Hybrid dynamic condensation for eigenproblems. *Computers & Structures* **56**(1), 105-112.
- [28] Kim Ki-Ook. 1996 Improved hybrid dynamic condensation for eigenproblems, *37th Structural Dynamics and Materials Conference*.
- [29] Abdalla M., Grigoriadis K. & Zimmerman. D. 2003 An Optimal Hybrid Expansion-Reduction Damage Detection Method. *Modal Analysis* **9**(8), 983-995.
- [30] Das A.S. & Dutt J.K. 2012 A reduced rotor model using modified SEREP approach for vibration control of rotors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **26**, 167-18.
- [31] Avitabile P. 2005. Model reduction and model expansion and their applications Part 1 theory. *Proc. 23rd Int. Modal Analysis Conf.*, Orlando, FL, US.
- [32] Duffey T. A., Doebling S. W., Farrar C. R., Baker W. E. & Rhee W. H. 2001 Vibration-Based Damage Identification in Structures Exhibiting Axial and Torsional Response. *Journal of Vibration and Acoustics*, **123**(1), 84.
- [33] Udawadia, F. E. 2005 Structural identification and damage detection from noisy modal data. *Journal of Aerospace Engineering*, **18**, 179-187.
- [17] Karaboga D. 2005 An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Techn. Rep. TR06, Erciyes Univ. Press, Erciyes.
- [18] Karaboga D. & Basturk B. 2007 A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, **39**(3), 459-471.
- [19] Karaboga D. & Akay, B. 2009 A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, **214**(1), 108-132.
- [20] Karaboga D. & Akay B. 2011 A modified artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems. *Applied Soft Computing*, (**11**)3021-3031.
- [21] Ding Z. H., Huang M. & Lu Z. R. 2016 Structural damage detection using artificial bee colony algorithm with hybrid search strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, **28**, 1-13.
- [22] Ding Z., Yao R., Li J. & Lu Z. 2017 Structural damage identification based on modified Artificial Bee Colony algorithm using modal data. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 1-21.
- [23] Guyan R. J. 1965 Reduction of stiffness and mass matrices. *AIAA Journal*, **3**(2) 380-380.
- [24] Leung A.Y. 1978 An accurate method of dynamic condensation in structural analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **12**(11), 1705-1715.

Structural Damage Detection Using Artificial Bee Colony Optimization Algorithm

S.A. Banimahd

Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran.

Banimahd@ardakan.ac.ir

Abstract

In recent years, damage identification of structures becomes more attractive for researchers in order to quantify the condition of structural system during service life. Moreover, identifying the damage location and severity is very important after disasters such as earthquake and terrorist attack. Structures can also be damaged by normal activity such as corrosion, aging, fatigue, wind, waveload, etc. Therefore, the structural health monitoring is an emerging field to ensure good performance of structures. In this paper, identification of the location and severity of damages in structures are studied by analytical method using artificial bee colony optimization (ABC). In the analytical method, the mass and stiffness matrices of structure can be determined by the finite element procedure. Considering the stiffness matrix of healthy structure and that of the damage structure, the location and severity of the damage can be determined. It is assumed that the global mass matrix remains unchanged after the damage occurs in the structure. The natural frequencies and mode shapes of damaged structure can be obtained by measurement. In the study, the damage characteristics are known. Then by applying the eigenvalue equation, the stiffness matrix is determined for damaged structure. Finding the location of damage is introduced as an inverse problem. The conventional methods are very expensive and time consuming, while meta-heuristic methods are capable to solve complex optimization problems. Swarm intelligence algorithm introduces the collective behavior of social insects colonies to solve optimization problems. Artificial bee colony algorithm is an evolutionary computing method, which was developed, based on the intelligent foraging behavior of honeybee swarm. Each food source is considered as a possible solution. The location and quality of the nectar from the flower is related to the damage properties and fitness function, respectively. The dimension of every artificial employed bee is equal to the number of member of the structure. Then quality value of the food source is evaluated by the fitness function. The best fitness value is memorized in each search. When the fitness value is improved after a predefined iteration, the new possible solution will be considered. In the ABC process, the number of food source, the limit and the maximum cycle number are three control parameters. In the optimization problem, applying a proper objective function is one of the indispensable part of the process. Since the structural damage detection is a highly nonlinear problem, a proper objective function can detect the damage accurately and quickly. There are various methods for damage detection, which generally can be classified into two categories, static and dynamic method. Because of the efficiency of the dynamic method, the objective function is selected based on the dynamic technique, which utilizes the eigenvalue problem. In the mathematical equation of the objective function, the mass and stiffness matrix of healthy structure is defined by finite element method. The natural frequencies and mode shapes obtained by the measurement or modeling the structure. The stiffness matrix of damaged structure is determined with the optimization algorithm to minimize the objective function. In a measurement test, the used sensors cannot detect all of the degrees freedom of a structure, therefore the obtained information in measurement include a limited number of frequencies or mode shapes. In addition, to avoid a time consuming process, it may be decided to utilize only a limit number of frequencies obtained by the measurement. The system equivalent reduction expansion process (SEREP), which is an accurate and efficient technique of model reduction, is utilized in the paper. Moreover, the damage detection is examined through three numerical examples, plane and space truss and palne frame, each one has two damage scenarios, which include noisy measurement data. The results indicate that the proposed method is a powerfull procedure to detect damages in structures.

Keywords: Damage detection, Artificial bee colony algorithm, SEREP codensatation.