مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره نوزدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۸

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

سید امیر بنی‌مهد

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه اردکان

Banimahd@ardakan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۱/۲۰] تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

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 خرپای مسطح و فضایی و یک قاب مسطح هر کدام با دو سناریوی خسارت درنظر گرفته شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که این روش توانایی و دقت قابل‌قبولی 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

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 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،

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 موثر عددی برای تعیین خسارت در سازه‌ها استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. با توجه به تعدّد الگوریتم‌های عددی بهینه‌سازی، پژوهش‌های بسیاری در زمینه تشخیص خسارت با استفاده از این تکنیک‌ها گزارش شده است [9-13]. بنابراین در صورتی‌که 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 حل مسأله بهینه‌سازی از الگوریتم زنبور عسل مصنوعی، ABC، استفاده می‌شود که روشی با تعداد پارامترهای کنترلی 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 گویان[1] [23]، روش فشرده‌سازی دینامیکی[2] [24-26]، روش فشرده‌سازی هیبریدی[3] [27,28] و[4] 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 آنجایی‌که 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 خرپای صفحه‌ای، خرپای فضایی و قاب دوبعدی 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

1 . Guyan condensation
2 .Dynamic condensation
3 .Hybrid condensation
4 .System equivalent reduction expansion process

اطلاعات شکل مودی و فرکانس سازه تعریف می‌شود. علت استفاده از این اطلاعات، دسترسی آسان و نسبتاً سریع از طریق پردازش پاسخ لرزه‌ای اندازه‌گیری‌شده در محل است. از آنجایی که هدف مسأله بررسی کارکرد صحیح روش تعیین خسارت سازه از روش بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل است، در این پژوهش فرض شده که میزان خسارت و محل آسیب‌دیدگی در سازه موردنظر مشخص است. بنابراین مشخصات دینامیکی، شامل فرکانس طبیعی و شکل مودی از طریق مدل‌سازی اجزای محدود سازه در دسترس است. همچنین فرض بر این است که بعد از وقوع خسارت، جرم سازه کم نمی‌شود یا تغییرات آن قابل چشم‌پوشی است. بنابراین می‌توان عملاً فرض نمود که ماتریس جرم سازه قبل و بعد از خسارت بدون تغییر باقی خواهد ماند. معادله حرکت دینامیکی برای سازه‌ای با میرایی صفر $(C=0)$ به شکل زیر است.

$$M\ddot{x}+Kx=0 \qquad (۱)$$

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 تغییرمکان و شتاب است. در مدل‌سازی ماتریس جرم از مدل جرم سازگار استفاده شده است. اگر تعداد درجات آزادی سیستم دینامیکی فوق را N درنظر بگیریم، رابطه (۱) را می‌توان به صورت N معادله درگیر(وابسته) بازنویسی نمود. از تحلیل مقادیر ویژه دستگاه معادلات مذکور رابطه بین شکل مودی و فرکانس‌های ارتعاشی به شکل زیر برای سازه سالم بدست می‌آید.

$$\left\{K^h-\left(\omega_i^h\right)^2 M\right\}\varphi_i^h=0, \quad i=1,2,\ldots,N. \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق K^h ماتریس سختی سازه سالم و ω_i^h فرکانس طبیعی سازه بر اساس شکل مودی iام سازه سالم، φ_i^h، است. درصورتی که این رابطه برای سازه آسیب‌دیده بازنویسی شود خواهیم داشت

$$\left\{K^d-\left(\omega_i^d\right)^2 M\right\}\varphi_i^d=0, \quad i=1,2,\ldots,N. \qquad (۳)$$

که در این رابطه K^d ماتریس سختی آسیب‌دیده، ω_i^d فرکانس طبیعی سازه بر اساس شکل مودی iام سازه آسیب‌دیده و φ_i^d، است. ماتریس جرم نیز در دو سازه آسیب‌دیده و سالم بدون تغییر باقی می‌ماند. در این مطالعه از کاهش مدول الاستیسیته برای درنظر گرفتن خسارت در سازه استفاده می‌شود. اگر فرض کنیم که β_j شاخص خسارت jامین عضو سازه باشد آنگاه

$$E_j^d=\left(1-\beta_j\right)E_j^h \qquad (٤)$$

که در این رابطه E_j^h و E_j^d به ترتیب مدول الاستیسیته jامین عضو سازه سالم و آسیب‌دیده می‌باشد. β عددی بین صفر و یک می‌باشد که عدد صفر بیانگر عدم خسارت و یک بیانگر خسارت کامل در عضو است. در سازه معین در صورتی‌که شاخص خسارت یکی از اعضا یک باشد، سازه ناپایدار می‌شود و تحلیل مقادیر ویژه آن امکان‌پذیر نیست. برای پرهیز از این مسأله، حد بالای شاخص خسارت همواره کمتر از یک منظور می‌شود. در مدل اجزای محدود، ماتریس سختی سازه از اسمبل‌کردن ماتریس سختی اعضای سازه بدست می‌آید. بنابراین ماتریس سختی سازه را می‌توان به شکل زیر ارایه نمود.

$$K^d=\sum_{j=1}^{me}K_j^d \qquad (۵)$$

که در این رابطه علامت Σ نشان‌دهنده اسمبل‌کردن اعضا بر اساس تعداد درجات آزادی، me تعداد اعضای سازه و K^d ماتریس سختی سازه آسیب‌دیده است. برای بیان ماتریس سختی بر اساس شاخص خسارت β، از جایگذاری رابطه (٤) در رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$K^d=\sum_{j=1}^{me}\left(1-\beta_j\right)K_j^h \qquad (٦)$$

از آنجایی‌که تعداد حسگرهای استفاده شده برای ثبت اطلاعات مربوط به مشخصات دینامیکی سازه معمولاً کمتر از درجات آزادی سازه مدل‌شده با روش اجزای محدود می‌باشد، پس روش فشرده‌سازی در این مطالعات مورد توجه قرار گرفت. با استفاده از روش فشرده‌سازی یک مدل به همراه تمامی درجات آزادی تبدیل به مدلی با تعداد درجات آزادی کمتر می‌شود درحالی‌که انتظار می‌رود مشخصات دینامیکی سیستم از قبیل فرکانس طبیعی و مودهای ارتعاشی آن تغییر نکند. هدف این است که با اطلاعات ناقص از مدل اجزای

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 مودهای 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:

$$\begin{bmatrix} M_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_m \\ x_s \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (۷)$$

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 آنجایی‌که 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 درنظر گرفته نشود. پس رابطه بین بردار تغییرمکان سازه و قسمت فعال آن به شرح زیر منظور می‌شود.

$$\{x\}=[x_m \quad x_s]^T=[T_u]\{x_m\} \qquad (۸)$$

که در این رابطه T_u عبارت است از

$$T_u=[U_n][(U_a{}^T U_a)^{-1} U_a{}^T] \qquad (۹)$$

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.

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

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، سایز بردار Aset همواره بزرگتر مساوی سایز بردار Mset است. با جایگزینی رابطه (۸) در رابطه (۷) و پیش‌ضرب $T_u{}^T$ در رابطه بدست‌آمده، فرم فشرده معادله حرکت حاصل می‌شود.

$$M_{con}\ddot{x}+K^d_{con}x=0 \qquad (۱۰)$$

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

$$K^d_{con}=T_u^T K^d T_u \qquad M_{con}=T_u^T M T_u \qquad (۱۱)$$

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

$$\left\{K^d_{con}-\left(\omega^d_{i,con}\right)^2 M_{con}\right\}\varphi^d_{i,con}=0 \qquad (۱۲)$$

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

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

برای رسیدن به فرکانس‌ها و شکل‌های مودی مدنظر مسأله بدون تغییر در دقت پاسخ‌ها، کاهش می‌یابد. همان‌گونه که پیشتر به آن اشاره شد بردارهای مودی و فرکانس‌های ارتعاشی سازه آسیب‌دیده بر اساس نتایج اندازه‌گیری مشخص است. در این مقاله فرض براین است که ماتریس جرم و سختی سازه قبل از آسیب مشخص است. از آنجایی‌که ماتریس جرم سازه قبل و بعد از ترک خوردن تغییرات ناچیزی دارد می‌توان از این تغییرات چشم‌پوشی 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 سازه‌هایی که اندرکنش بین درجات آزادی سازه کوچک باشد منجر به جواب خواهد شد. درصورتی‌که سازه دارای درجات آزادی همبسته باشد جواب‌های قابل‌قبولی حاصل نمی‌شود [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 ($Mset<Aset$).

تعیین میزان خسارت و محل آن با روش‌های معمولی مانند بازرسی چشمی کاری سخت و زمان‌بر است. بسیاری از سازه‌ها نیز به بازرسی و مراقبت لحظه‌ای 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 راه‌حل این است که ماتریس K^{d}_{con} به گونه‌ای تعیین شود که در رابطه (۱۲) صدق کند. با درنظر گرفتن شاخص خسارت هر عضو یعنی β_j در ماتریس سختی اجزای سازه و جایگذاری در رابطه (۱۲)، یک چند جمله‌ای شامل متغیرهای β_j که j نماینده j امین عضو سازه است حاصل می‌شود. حل چنین معادلاتی برای تعیین میزان و محل خسارت با روش‌های مستقیم می‌تواند بسیار پرهزینه و پیچیده باشد، درحالی‌که اگر این رابطه به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی درنظر گرفته شود با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با صرف هزینه کمتر می‌توان به جواب قابل‌قبول رسید. بنابراین تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی به فرم زیر تعریف می‌شود.

$$F\left(\beta\right)=\left\{K^{d}_{con}-\left(\omega^{d}_{i,con}\right)^{2}M_{con}\right\}\varphi^{d}_{i,con} \qquad (۱۳)$$

$$i=1,2,\ldots,N \qquad \beta=\left[\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_{me}\right]$$

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

$$\varphi_i^{noisy}=\varphi_i\left(1+NL\times rand\left[-1\ \ 1\right]\right)\ i=1,2,\ldots,N \qquad (۱٤)$$

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 اندازه‌گیری و حسگرها است. $ran[-1\ \ 1]$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده ۱- تا ۱ است [33]. از آنجایی‌که مقدار β به عنوان مجهول مسأله است می‌توان با سعی و خطا به جواب نزدیک شود. توابعی 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 مینیمم‌های نسبی پیدا نماید، در این پژوهش اهمیت پیدا می‌کند. یکی از الگوریتم های بهینه‌سازی که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی است که در این مقاله نیز با توجه به ویژگی‌های مناسب همگرایی و سرعت قابل قبول و همچنین تعداد کم پارامترهای کنترلی، مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- بهینه‌سازی با الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی

برای حل مسایلی با رویکرد تحلیل معکوس مانند مسأله تشخیص خرابی سازه می‌توان از تکنیک‌های عددی بهینه‌سازی سود جست. پژوهشگران علوم طبیعی در سال‌های اخیر با توجه به رفتار جمعی برخی حیوانات دریافته‌اند که عملکرد گروهی آنها توانسته راهکاری هوشمندانه و

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[5]، الگوریتم ژنتیک[6]، الگوریتم زنبورعسل[7] و نظایر آن اشاره کرد. هرکدام 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 سرعتِ 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 تجمعی 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 پایه‌ریزی و ارایه شد [17] و اصلاحاتی نیز در ادامه روی آن صورت پذیرفت [22-18]. در این روش که بر اساس رفتار تجمعی 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. درصورتی‌که 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 صورتی‌که 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 نظرگرفته شود. در مسأله مورد نظر این تحقیق که تشخیص خرابی سازه می‌باشد، هدف رسیدن به مقدار صحیح بردار β می‌باشد. در صورتی‌که 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.

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

۱- جمعیت اولیه $(X_1, X_2, ..., X_{NF})$ برای جستجوی اولیه و تصادفی تشکیل می‌شود بطوری‌که هریک از مولفه‌های آن بردار احتمالی پاسخ مسأله یعنی $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{iD})$ می‌باشد که مولفه‌های آن از رابطه زیر تعیین می‌گردند.

$$X_{ij} = X_{min\,j} + rand[0\ \ 1](X_{max\,j} - X_{min\,j}) \qquad (۱۵)$$
$$j = 1, 2, ..., D \quad i = 1, 2, ..., NF$$

$rand[0\ \ 1]$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده صفر تا یک است. $X_{max\,j}$ و X_{min} کران‌های بالا و پایین جواب‌های 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 کوچک‌تر از یک منظور می‌شود. پس از تولید جمعیت اولیه کیفیت هر منبع غذایی محاسبه می‌شود.

۲- هر زنبور کارگر، همسایگی منبع غذایی یافت‌شده را برای یافتن منبع غذایی جدید با استفاده از رابطه زیر جستجو می‌نماید.

$$X_{ij}^{new} = X_{ij} + \varphi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \qquad (۱۶)$$
$$j = 1, 2, ..., D \quad k = 1, 2, ..., NF \quad j \neq k$$

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

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

٤- پس از اتمام جستجو احتمال هریک از پاسخ‌ها با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$P_i = Fit_i \Big/ \sum_{n=1}^{NF} Fit_n \qquad (۱۷)$$

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

$$Fit_i = \begin{cases} \dfrac{1}{1+f_i} & f_i \geq 0 \\ 1+|f_i| & f_i < 0 \end{cases} \qquad (۱۸)$$

f_iمقدار تابع هدف برای منبع غذایی iام می‌باشد.

۵- در این مرحله جمعیت جدید زنبورهای کارگر بر اساس رابطه (١٦) و بر اساس کیفیت منبع غذایی بدست‌آمده در مرحله قبل از کندو خارج می‌شود و بر اساس معیار ارایه‌شده در مرحله سوم نسبت به انتخاب منبع جدید یا ادامه کار با همان منابع قدیم تصمیم‌گیری خواهد نمود.

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

۷- چنانچه فرآیند جستجو بر اساس محدودیت مشخص‌شده به انتهای خود رسیده باشد، بهترین جواب گزارش می‌شود، درغیر این صورت الگوریتم به مرحله دوم می‌رسد. رابطه‌ای برای تعیین پارامتر محدودکننده (MCN) توسط کارابوگا و همکاران [19] پیشنهاد شده است که حاصل‌ضرب تعداد منابع غذا در طول بردار پاسخ $(MCN = NF \times D)$ است.

با استفاده از روش ABC انتظار می‌رود شاخص‌های خسارت اعضا به‌گونه‌ای تعیین شود که بردار $F(\beta)$ را کمینه نماید. به عبارت دیگر بردار $\beta^T = (\beta_1, \beta_2, ..., \beta_{me})$ به‌گونه‌ای باشد که $F(\beta)$کمترین شود.

٤- نمونه‌های عددی

در این بخش کارایی و دقت الگوریتم زنبور عسل برای حل مسایل بهینه‌سازی یافتن خسارت در سازه با استفاده از سه نمونه بررسی می‌شود: خرپای دوبعدی با ۳۱ المان، خرپای سه‌بعدی با ۲۵ المان و قاب دوبعدی با ۱۰ المان، هرکدام با دو سناریوی خسارت. کد کامپیوتری در نرم‌افزار متلب بر اساس الگوریتم زنبورعسل گسترش داده می‌شوئد و با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه، فرکانس‌های سازه سالم و آسیب‌دیده به عنوان ورودی به الگوریتم زنبور عسل مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً جمعیت کلونی کمینه دو برابر پارامترهای هر مساله منظور می‌شود. بنابراین تعداد زنبورهای نمونه عددی اول تا سوم به ترتیب ۵۰، ۷۰ و ۲۰ منظور می‌شود. تعداد بیشینه تلاش‌های زنبورهای کارگر که منجر به

نتیجه بهتری نشود به عنوان محدودیت الگوریتم معرفی می‌شود. با توجه به تحلیل انجام‌شده 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 ارایه‌شده برای تعداد تکرارها در الگوریتم زنبور عسل (MCN=NF×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. ازآنجایی 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- خرپای دوبعدی با ۳۱ المان

خرپای 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 $E=0.71\times10^{6}\,kg/cm^{2}$ و وزن واحد حجم $\gamma=2810\,kg/m^{3}$ است. مساحت مقطع $A=25\,cm^{2}$ است. با توجه به درنظرگرفتن 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 ٤٠ 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 درنظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی شرایط واقعی اطلاعات ثبت‌شده مربوط به فرکانس سازه که بعضاً ممکن است با نویز همراه باشد، ۵ درصد نویز با استفاده از رابطه (١٤) در فرکانس‌های محاسبه‌شده اعمال می‌شود.

شکل ۱. مدل اجزای محدود خرپای صفحه‌ای

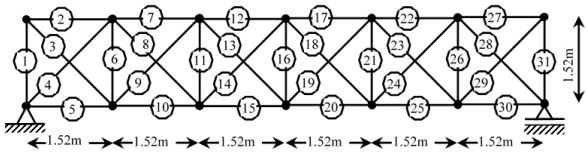

Fig. 1. Finite element model of the plane truss

شکل ۲. نتایج همگرایی پاسخ الگوریتم زنبورعسل مصنوعی در خرپای صفحه‌ای

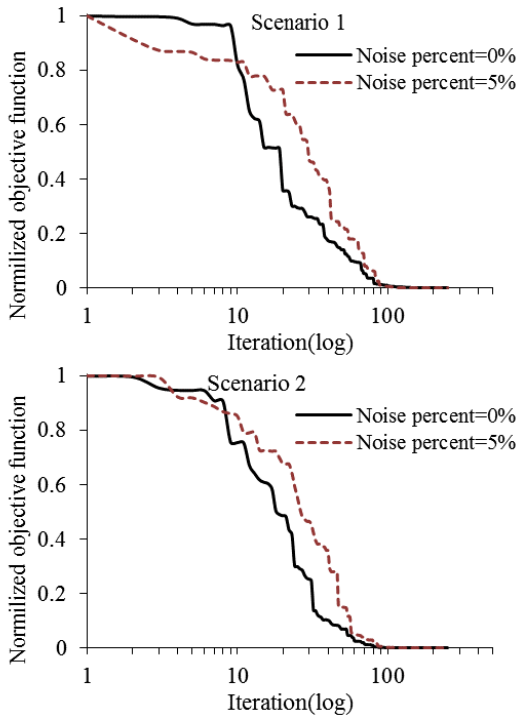

Fig. 2. The convergence of the ABC method for the plane truss

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) ارایه 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 خرپای دوبعدی بر اساس دو سناریو خسارت بعد از ۱۵۰ تکرار نشان داده شده است و نمایانگر نتایج قابل‌قبول در تعیین محل و میزان خسارت می‌باشد. در صورتی که نویز در تحلیل وارد شود، نتایج بدست‌آمده دارای خطای ناچیزی است که می‌توان از

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 خرپای صفحه‌ای

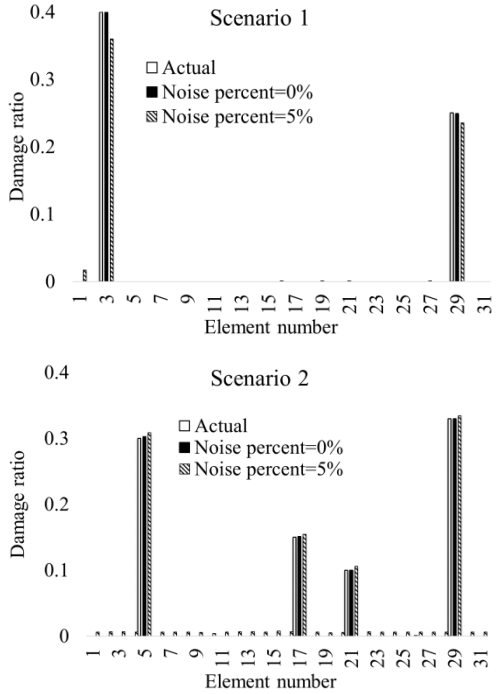

Fig. 3. The result of damage detection in the plane truss

۲-۴- خرپای سه‌بعدی با ۲۵ المان

خرپای سه بعدی با ۲۵ المان به همراه مختصات گره‌های آن در شکل (٤) نشان داده شده است. در مدل اجزای محدود هر گره شامل سه درجه آزادی انتقالی می‌باشد. مصالح مورد استفاده فولاد با مدول الاستیسیته $E=2.04\times10^{6}\,kg/cm^{2}$ و وزن واحد حجم $\gamma=7800\,kg/m^{3}$ و مساحت تمامی اعضا $A=75cm^{2}$ است. دو سناریوی خسارت برای بررسی قابلیت و درستی روش ارایه‌شده درنظر گرفته شده است. در سناریوی اول المان های شماره ۳، ١٦ و ۲۵ به ترتیب ۲۵، ۳۵ و ۵۰ درصد و در سناریوی دوم المان شماره ۱۹ به میزان ٤۰ 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 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 زنبور عسل و بهینه‌سازی تابع هدف ارایه شده، محل خسارت و میزان آن در شکل (٦) برای حالت نویزدار و بدون نویز فرکانس و مقایسه آن با مقدار دقیق تحلیلی ارایه شده است. مطابق این شکل با چشم‌پوشی کردن از خطاهای ناچیز در حالت فرکانس‌های نویزدار می‌توان خسارت در سازه را با روش ارایه‌شده به درستی تشخیص داد.

شکل ٤. مدل اجزای محدود خرپای فضایی

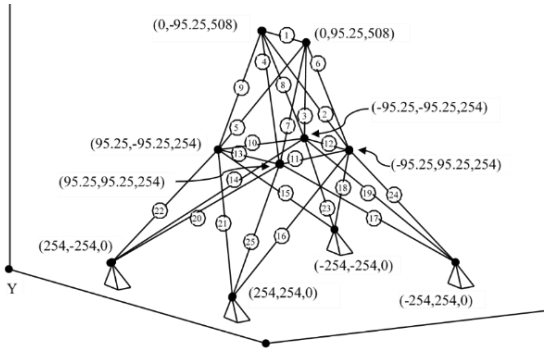

Fig. 4. Finite element model of the space truss

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

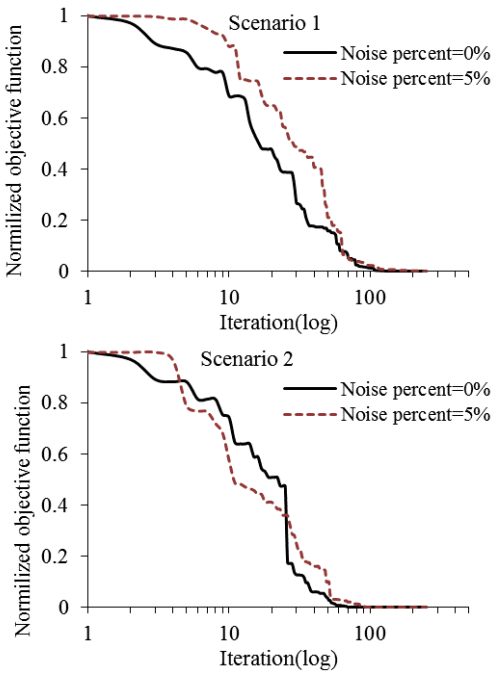

Fig. 5. The convergence of the ABC method for the space truss

شکل ٦. نتایج مربوط به تعیین خسارت در خرپای فضایی

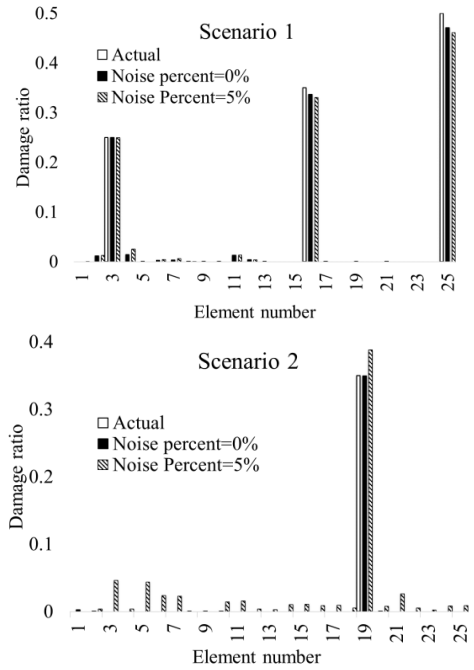

Fig. 6. The result of damage detection in the space truss

شکل ٧. مدل اجزای محدود قاب صفحه‌ای

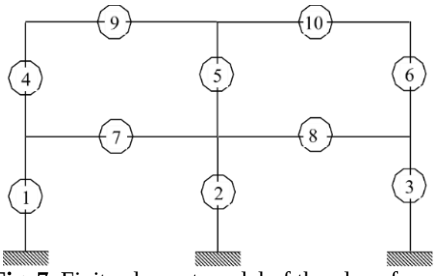

Fig. 7. Finite element model of the plane farme

شکل ٨. نتایج همگرایی پاسخ الگوریتم زنبورعسل مصنوعی در قاب

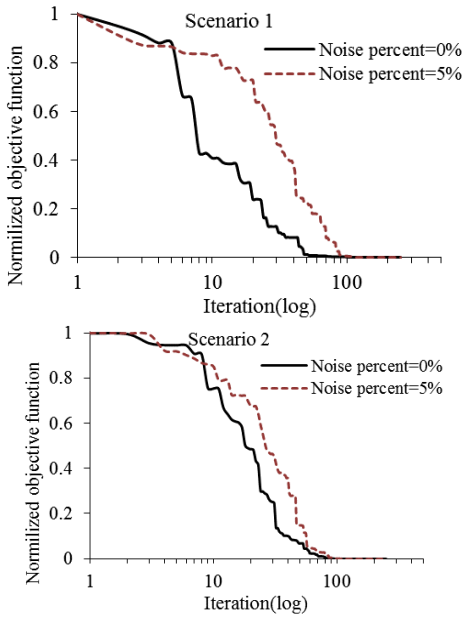

Fig. 8. The convergence of the ABC method for the plane frame

۳-۴- قاب صفحه‌ای دوطبقه

مدل اجزای محدود یک قاب دوبعدی 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 $E=2.04\times10^{6}\ kg/cm^{2}$ و وزن واحد حجم $\gamma=7800\ kg/m^{3}$ 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 ٤٢ درصد کاهش سختی خمشی درنظر گرفته شد. نتایج تعیین خسارت در دو سناریوی مختلف به صورت نویزدار و بدون نویز درنظر گرفته شده است. در شکل (۸) همگرایی الگوریتم مذکور با استفاده از ۲۰ زنبورعسل مصنوعی بعد از ۲۵۰ تکرار را نشان می‌دهد که سرعت قابل‌قبولی است. کارایی الگوریتم زنبور عسل در تعیین خسارت با توجه به چشم‌پوشی کردن از خطاهای جزیی مربوط به حالت نویزدار در شکل (۹) مشخص است.

شکل ۹. نتایج مربوط به تعیین خسارت در قاب صفحه‌ای

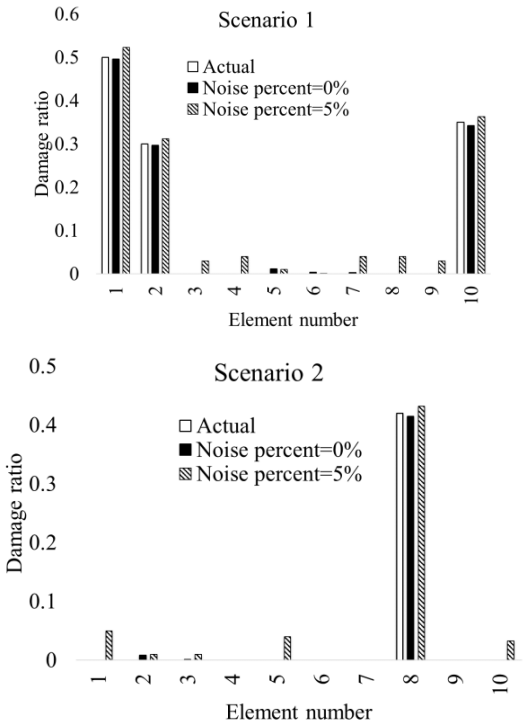

Fig. 9. The result of damage detection in the plane frame

۵- نتیجه‌گیری

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 درنظر 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 درنظر گرفتن سناریوی خسارت از پیش تعیین‌شده 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 نویزدار موفق عمل نماید.

٦- مراجع References

[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 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)

[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.

[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] Udwadia, F. E. 2005 Structural identification and damage detection from noisy modal data. *Journal of Aerospace Engineering*, **18**, 179–187.

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 attak. Structures can also be damaged by normal activity such as corrosion, aging, fatique, 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.