

تشخیص خرابی در پایه‌های نگهدارنده منفرد با ممان اینرسی متغیر با استفاده از الگوریتم APSO

حامد قوهانی عرب^{*}، علی محلاتی راینی، آرش نادری، محمدرضا سهرابی، محمدرضا قاسمی

گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

شخصی خرابی

APSO

پایه نگهدارنده منفرد

روش‌های تشخیص خرابی مبتنی

بر ارتعاش

تحلیل دینامیکی

خلاصه: در این مقاله، تشخیص خرابی پایه‌های نگهدارنده منفرد با ممان اینرسی متغیر مطالعه گردیده است. خرابی سازه با استفاده از روش ارتعاش شناسایی شده است. در این روش برای کشف محل و شدت خرابی از الگوریتم فرااکتشافی APSO استفاده شده است. تابع هدف برای کشف خرابی یک شاخص همبستگی مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی در نظر گرفته شده است. به منظور تسریع در محاسبه فرکانس‌های طبیعی سازه از روش تکرار استفاده شده است. در این مقاله، خرابی به صورت کاهش سختی المان در مدل‌سازی اجزای محدود اعمال شده است و برای تطابق بیشتر با واقعیت، خطای اندازه‌گیری در فرکانس نیز لحاظ گردیده است. برای ارزیابی کارایی و توانمندی روش پیشنهادی در تشخیص خرابی پایه‌های نگهدارنده، دو مثال عددی شامل یک پایه نگهدارنده دوربین مداربسته پلیس و یک پایه نگهدارنده مخزن آب تحت سناریوهای مختلف خرابی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مثال اول و دوم، سازه‌ی دارای مقطع متغیر به ترتیب توسط ۲۵ و ۱۵ المان با ممان اینرسی یکنواخت مدل‌سازی گردیده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد؛ علی‌رغم پیچیدگی برخی از سناریوهای خرابی، روش پیشنهادی قادر است نه تنها محل، بلکه شدت خرابی را نیز به طرز قابل اعتمادی کشف نماید و بالطبع این الگوریتم قابلیت شناسایی خرابی دیگر سازه‌ها را نیز دارد.

۱- مقدمه

از طریق روش‌های تشخیص محل خرابی مانند بازرسی بصری یا روش‌های تجربی موضعی همیشه امکان پذیر نیست. برای غلبه بر این مشکل، تکنیک‌های تشخیص خرابی توسعه داده شده‌اند [۲] و [۱]. ایده اصلی در این تکنیک‌ها این است که خرابی جزئی سازه باعث کاهش سختی سازه می‌شود که این امر منجر به ایجاد تغییر در هر دو پاسخ دینامیک و استاتیک سازه می‌گردد. تشخیص خرابی مبتنی بر ارتعاش^۱ یکی از این تکنیک‌ها است [۳]. اساس این روش بر پایه بررسی تغییراتی است که در ویژگی‌های مودال سازه (فرکانس‌های مودال، اشکال مودی و میرایی مودال) رخ می‌دهد. این ویژگی‌ها به طور گسترده‌ای برای شناسایی خرابی‌های سازه‌ای استفاده شده‌اند [۴].

مهندسان و طراحان همواره به دنبال ارائه طرحی هستند که با استفاده بهینه از منابع، پایداری خود را حفظ کرده و به یادگار از آن‌ها باقی بماند. اما فارق از روند و نوع طراحی صورت گرفته، تمامی سازه‌ها همواره به دلیل مخاطرات طبیعی و غیرطبیعی مانند زلزله، طوفان، آتش سوزی، خوردگی و یا سایر موارد، در طول دوران عمر خود می‌توانند دچار خرابی شوند. این خرابی‌های جزئی در صورت عدم شناسایی و رفع به موقع، ممکن است منجر به خرابی فاجعه-بار سازه گردند. بنابراین، شناسایی محل و میزان این خرابی‌ها و همچنین روند گسترش آن از نظر تامین امنیت جانی و صرفه‌جویی اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. یافتن محل و شدت این خرابی‌ها

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghohani@eng.usb.ac.ir



کردند. اسلامی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، اقدام به تشخیص خرابی مسائل تنش صفحه‌ای کردند [۸]. هر چند پژوهش‌های متعددی در زمینه تشخیص خرابی سازه‌ها انجام شده است اما با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون اقدامی جهت تشخیص خرابی پایه‌های نگهدارنده انجام نشده است. در این مقاله جهت تشخیص خرابی پایه‌های نگهدارنده منفرد با ممان اینرسی متغیر، بسته‌ی جدیدی پیشنهاد گردیده است. در بسته پیشنهادی یافتن محل و شدت خرابی بر مبنای حل یک مسئله بهینه‌سازی است که منجر به حداقل شدن اختلاف بین فرکانس‌های ارتعاش آزاد سازه خراب و مدل محاسباتی می‌گردد. بدین منظور از تابع هدف کارایی استفاده شده است که قادر به یافتن محل و درصد صحیح خرابی است. در فرآیند بهینه‌سازی در حل مسائل تشخیص خرابی، برای اولین بار از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات پیشرفته استفاده شده است که در بهینه‌های محلی متوقف نمی‌گردد و قادر به یافتن پاسخ صحیح است. به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت آن، برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی سازه، از روش تکرار ماتریسی استفاده شده است که بدون کمترین خطایی قادر به محاسبه فرکانس‌های ارتعاشی سازه در مدت زمان کمتر می‌باشد. ادامه این مقاله به شرح ذیل سازماندهی شده است. در بخش ۲ فرم بهینه‌سازی مسئله ارزیابی خرابی تشریح گردیده است. در بخش ۳ الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات توضیح داده شده است. در قسمت ۴ به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی دو مثال عددی بررسی گشته است و نهایتاً در قسمت ۵ نتایج ارائه شده است و پس از آن منابع مورد استفاده در این تحقیق ذکر گردیده‌اند.

۲- فرم بهینه‌سازی مسئله ارزیابی خرابی

وقوع خرابی در یک عضو یا المان می‌تواند باعث کاهش سختی و جرم آن عضو یا المان شود که در نتیجه منجر به تغییر خصوصیات مودال سازه‌ای مانند فرکانس‌های مودال می‌شود. در این تحقیق فرض می‌شود که خرابی فقط باعث کاهش سختی عضو می‌شود. روش‌های معکوس با مقایسه پاسخ سازه قبل و بعد از وقوع خرابی قادرند محل و شدت خرابی را مشخص کنند. برای این منظور، روش‌های معکوس عموماً با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی، بردار متغیرهای خرابی را که شاخص همبستگی بین پاسخ‌های سازه‌ای قبل و بعد از وقوع

در روش تشخیص خرابی مبتنی بر ارتعاش، یک مسئله خرابی به صورت یک مسئله معکوس تعریف می‌شود که داده‌های آن مشخصات مودال سازه می‌باشند. برای حل این نوع از مسائل معکوس، تاکنون روش‌های بسیاری ارائه شده است. یکی از روش‌های محبوب، تبدیل این مسائل به مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. در این روش، شدت خرابی در هر عضو یا المان از سازه به عنوان یک متغیر طراحی در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف به گونه‌ای تعریف می‌شود تا این متغیرها به گونه‌ای تنظیم گردند که ویژگی‌های مودال تحلیلی با مقادیر اندازه‌گیری شده سازه آسیب دیده، مطابقت داشته باشند [۳]. در سال ۲۰۰۵ مایتی و تریپاتی روشی را برای شناسایی و ارزیابی آسیب سازه‌ای از طریق تغییرات ایجاد شده در فرکانس‌های طبیعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه دادند [۵]. یک روش بهینه‌سازی غیر کلاسیک شامل استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک^۱ توسط پورا و تورس در سال ۲۰۰۶ برای کشف نواحی آسیب دیده در سازه پیشنهاد شد. این روش مبتنی بر تغییرات در فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی بود [۴]. در سال ۲۰۱۰ ساندش و شانکار الگوریتم بهینه‌سازی جدیدی را که ترکیب دو روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات^۲ و الگوریتم ژنتیک بود، برای تشخیص آسیب سازه‌ای پیشنهاد دادند [۵]. سپس با استفاده از الگوریتم ترکیبی معرفی شده و فرمولاسیون دامنه زمانی معکوس خرابی از نوع ترک‌های متعدد در یک صفحه نازک را شناسایی کردند. شناسایی با استفاده از پاسخ‌های شتاب حوزه زمان انجام شد. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات ایمن^۳، که ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات و سیستم ایمنی مصنوعی است، توسط کانگ و لی برای شناسایی خرابی سازه‌ها در سال ۲۰۱۲ پیشنهاد شد [۶]. تابع هدف بر مبنای تغییرات فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی بود.

جستجوی سیستم شارژی پیشرفته^۴ برای تشخیص خرابی سازه‌های خرابی با استفاده از تغییر در فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مود، توسط کاوه و ذوالقدر در سال ۲۰۱۵ پیشنهاد شد [۱۰ و ۹]. نوبهاری و قاسمی یک الگوریتم جستجوی فراکتشافی جدید با نام الگوریتم جستجوی موقعیت با استفاده از اکوی صدا را برای شناسایی خرابی سیستم‌های سازه‌ای در سال ۲۰۱۷ ارائه دادند [۷]. آن‌ها از یک تابع هدف که در برگیرنده تغییرات فرکانس‌های طبیعی بود، استفاده

1 GAs
2 PSO
3 IEPSO
4 CSS

$$\begin{aligned} & \text{Find } X^T = \{x_1, x_2, \dots, x_{ne}\} \\ & \text{to Maximize ECBI}(X) \\ & \text{Subjected to: } X^l \leq X \leq X^u \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، X^l و X^u به ترتیب حد بالا و پایین بردار متغیرهای خرابی می‌باشند.

فرکانسهای طبیعی سازه بر اساس مفهوم ارتعاش آزاد و حل مسئله مقدار ویژه توسط رابطه (۵) قابل محاسبه است [۱۰].

$$|K - M\omega^2| = 0 \quad (5)$$

در رابطه (۵)، K ماتریس سختی سازه، M ماتریس جرم سازه و ω فرکانس سازه در مودهای مختلف میباشند. به منظور اعمال میزان خرابی می‌توان در رابطه (۵) ماتریس سختی را با لحاظ کردن درصد خرابی اعضا محاسبه نمود. هرچند شکل ظاهری معادله (۵) بسیار آسان به نظر میرسد، اما به دلیل محاسبه دترمینان، برحسب پارامتر مجهول ω و سپس حل معادله چند جمله ای با مرتبه ای به اندازه دو برابر درجات آزادی سازه، معمولاً انجام محاسبات برای سازه های با درجات آزادی نسبتاً زیاد، بسیار زمان بر می‌شود. به منظور رفع این نقیصه، محققان حوزه دینامیک سازه، روشهای عددی را ابداع کرده‌اند که نیاز به محاسبه دترمینان رابطه (۵) را از بین می‌برد و در نتیجه باعث افزایش چشمگیر سرعت محاسبات می‌گردد [۱۰]. در این مقاله فرکانسهای ارتعاشی سازه با استفاده از روش تکرار ماتریسی که یکی از روش‌های پایه و قدیمی جهت تخمین فرکانس سازه می‌باشد، محاسبه گردیده است [۱۲ و ۱۱]. در این روش برای محاسبه فرکانس مود N ام سازه (ω_n) در مرحله تکرار i ام از رابطه (۶) استفاده می‌شود. تکرار تا زمانی که فرکانس محاسبه شده در پروسه به دقت مورد نظر نرسد، ادامه پیدا می‌کند.

$$\omega_N^2 = \frac{(\bar{V}_N^{(i)})^T M V_N^{(i-1)}}{(\bar{V}_N^{(i)})^T M \bar{V}_N^{(i)}} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $\bar{V}_N^{(i)}$ بردار نرمال شده شکل مود N ام در مرحله تکرار i ام می‌باشد که از تقسیم بردار شکل مود بر اولین عنصر بردار

خرابی را به حداقل یا حداکثر می‌رساند، پیدا می‌کنند [۹]. در این تحقیق از یک شاخص مبتنی بر همبستگی که شاخص همبستگی کارآمد (ECBI) نامیده می‌شود و در سال ۲۰۱۱ توسط نوبهاری و سیدزاده [۳] ارائه شده است، استفاده می‌شود.

$$ECBI(X) = \frac{1}{2} \left[\frac{|\Delta F^T \cdot \delta F(X)|^2}{(\Delta F^T \cdot \Delta F)(\delta F^T \cdot \delta F(X))} + \frac{1}{nf} \sum_{i=1}^{nf} \frac{\min(f_i(X), fd_i)}{\max(f_i(X), fd_i)} \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، X بردار متغیرهای خرابی است و ne مؤلفه دارد. ne تعداد المان‌ها یا اعضای سازه می‌باشد. fd_i و $f_i(X)$ به ترتیب i امین مؤلفه های بردار فرکانس سازه آسیب دیده (F_d) و بردار فرکانس مدل تحلیلی ($F(X)$) هستند. ΔF به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\Delta F = \frac{F_h - F_d}{F_d} \quad (2)$$

F_h و F_d به ترتیب بردارهای فرکانسهای طبیعی سازه سالم و خراب هستند. به طریق مشابه، $\delta F(X)$ به صورت رابطه (۳) قابل تعریف است:

$$\delta F(X) = \frac{F_h - F(X)}{F_h} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $F(X)$ بردار فرکانسهای طبیعی مدل تحلیلی است. nf تعداد فرکانسهایی است که برای تشخیص خرابی سازه‌ای در نظر گرفته می‌شود. دامنه $ECBI$ از ۰ تا ۱ متغیر است. مقدار ۱ بدان معنی است که بردار فرکانسهای تحلیلی با بردار فرکانس سازه خراب یکسان می‌باشد، $F(X) = F_d$. بنابراین، تشخیص خرابی می‌تواند به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه (۴) بیان شود:

در رابطه (۱۱)، اندیس j در عبارت $\varphi_{(j,N-1)}$ نشان دهنده درایه j ام بردار شکل مود می‌باشد و m_j موید جرم درجه آزادی j است و DOF نشان دهنده تعداد درجات آزادی سیستم است. در محاسبه ماتریس جرم سازه از روش جرم متمرکز استفاده شده و سختی هر المان بر اساس ممان اینرسی نقطه وسط آن المان محاسبه گردیده است. برای هر گره یک درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی لحاظ گردیده است.

۳- روش PSO

الگوریتم تراکم ذرات که از هوش جمعی موجوداتی مانند دسته پرندگان و یا گروه ماهی‌ها جهت جستجوی غذا الهام گرفته شده است، یک تکنیک بهینه‌سازی بر پایه قوانین احتمال می‌باشد. ایده اولیه آن توسط ابره‌ارت دانشمند علوم کامپیوتر و کندی روان‌شناس مسائل اجتماعی در سال ۱۹۹۵ ارائه شد [۱۷ و ۱۶]. ایده پایه روش PSO را می‌توان بدین ترتیب بیان نمود؛ هر ذره با جابه‌جا شدن در فضا در حال یافتن نقطه بهینه است و بهترین موقعیتی را که در مراحل مختلف جستجو تجربه می‌کند (بهترین موقعیت فردی هر ذره $(P_{best,i})$)، به خاطر می‌سپارد. در هر مرحله از جستجو، ذرات با تبادل اطلاعات مربوط به موقعیتی که در آن قرار دارند به منظور یافتن جواب بهینه، همدیگر را یاری می‌کنند؛ به این صورت که هر ذره از موقعیت ذره‌های که بهترین تطابق را دارد (بهترین موقعیت سراسری اجتماع (G_{best})) برای تنظیم سرعت خود استفاده می‌کند. سرعت هر ذره در هر مرحله با اضافه کردن سهم وزن یافته تصادفی در جهت بهترین موقعیت فردی آن ذره و سهم وزن یافته تصادفی در جهت بهترین موقعیت موجود اجتماع، به سرعت مرحله قبل ذره محاسبه می‌گردد. موقعیت جدید هر ذره نیز با اضافه کردن سرعت جدید به موقعیت قدیمی آن ذره به دست می‌آید. سرعت جدید ذره i در مرحله t با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$V_t^i = \omega V_t^{i-1} + C_1 r_1 (P_{best,i} - X_t^{i-1}) + C_2 r_2 (G_{best,i} - X_t^{i-1}) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، ω ضریب اینرسی است و C_1 و C_2 ضریب

به دست می‌آید. نشان دهنده بردار نرمال نشده شکل مود N ام در مرحله تکرار- i می‌باشد. برای گام اول می‌توان مقدار این بردار را شبیه به شکل مود مورد نظر انتخاب نمود. اما در این تحقیق برای کلیه مودها از برداری با کلیه عناصر ۱ استفاده شده است. این امر موجب افزایش کاهش همگرایی می‌گردد ولی در طرف مقابل منجر به ساده شدن فرآیند برنامه کامپیوتری نوشته شده می‌گردد. ماتریس M ، ماتریس جرم سازه می‌باشد. جهت انجام فرآیند تکرار و تخمین بردار $\bar{V}_N^{(i)}$ از رابطه (۷) استفاده می‌شود:

$$V_N^i = D_N \times \bar{V}_N^{(i-1)} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $D_N D_N$ ماتریس دینامیکی مربوط به مود N ام است که توسط رابطه (۸) محاسبه می‌گردد:

$$D_N = D \times S_N \quad (8)$$

در رابطه (۸)، D ماتریس دینامیکی است که توسط رابطه (۹) محاسبه می‌گردد و ماتریس S_N ماتریس روبشی است که جهت اعمال شرایط متعامد مودی و حذف اثرات مودهای پایین‌تر استفاده می‌گردد. مقدار این ماتریس برای مود اول، ماتریس همانی است و برای سایر مودها توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد:

$$D = k^{-1} m \quad (9)$$

$$S_N = S_{N-1} - \frac{1}{M_{N-1}} \varphi_{N-1} \varphi_{N-1}^T m \quad (10)$$

در رابطه (۹)، K و m ماتریس سختی و جرم سازه می‌باشند. در رابطه (۱۰)، نشان دهنده شکل مود نهایی به دست آمده برای مود- N ام می‌باشد و M_{N-1} جرم مشارکت مود- N می‌باشد که توسط رابطه (۱۱) قابل محاسبه است.

$$M_{(N-1)} = \sum_{j=1}^{DOF} (\varphi_{(j,N-1)}^2 \times m_j) \quad (11)$$

$$\omega_t = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})t}{t_{\max}} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) ω_t ، ω_{\min} و ω_{\max} به ترتیب مقادیر ضریب اینرسی در مرحله t ، ضریب اینرسی نهایی و ضریب اینرسی اولیه می‌باشند و t_{\max} نشان دهنده تعداد کل مراحل تکرارها می‌باشد. مقادیر ω_{\max} و ω_{\min} معمولاً ۰/۴ و ۰/۹ انتخاب می‌گردند.

۳-۱- الگوریتم بهبود یافته روش اجتماع پرندگان (APSO)

لازم به توضیح است که محاسبه بردار سرعت با استفاده از رابطه (۱۲) اولین شیوه ارائه شده برای محاسبه سرعت در روش PSO می‌باشد [۱۳]. به منظور افزایش سرعت همگرایی روابطی توسط سایر محققین ارائه گشته است. در این تحقیق روش ارائه شده توسط تیان و لیو مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. این روش در ادامه به صورت مختصر تشریح می‌گردد. در این شیوه، اجتماع بر اساس شایستگی ذرات به سه زیر اجتماع تقسیم می‌گردد. سرعت ذرات که در بهترین زیر اجتماع قرار دارند به دلیل نزدیکی زیاد این ذرات به نقطه بهینه با حذف جمله مربوط به بهترین موقعیت خود ذره، محاسبه می‌گردد:

$$V_i^t = \omega V_i^{t-1} + C_2 r_2 (G_{\text{best},i} - X_i^{t-1}) \quad (15)$$

سرعت ذراتی که در زیر اجتماع میانی قرار دارند، توسط رابطه (۱۲) که قبلاً بیان شد، محاسبه می‌گردد و سرعت ذراتی که در بدترین زیر اجتماع قرار دارند به منظور کاهش بهتر فضای جستجو توسط رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد:

$$V_i^t = \omega V_i^{t-1} + C_1 r_1 (P_{\text{best},i} - X_i^{t-1}) + C_2 r_2 (P_{\text{best},k} - X_i^{t-1}) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، $P_{\text{best},k}$ نشان دهنده بهترین موقعیت ذره k در مراحل گذشته است. ذره k به طور تصادفی از میان ذرات زیر اجتماع میانی انتخاب می‌گردد. در این شیوه تعیین موقعیت جدید ذراتی که در زیر اجتماع میانی و بدترین زیر اجتماع قرار دارند توسط رابطه

یادگیری فردی و اجتماعی می‌باشند. این ضرایب در واقع نشان دهنده میزان تاثیر بهترین پاسخ یافته شده هر یک از ذرات تاکنون و بهترین پاسخ یافته شده کلی بر سرعت ذره می‌باشند. V_t^{i-1} ، V_t^i و X_t^i به ترتیب بردار سرعت در مرحله قبل، بردار سرعت در مرحله جاری و بردار موقعیت مرحله قبل برای i امین ذره می‌باشند. $P_{\text{best},i}$ مبین بردار بهترین موقعیت ذره i ام تاکنون می‌باشد و G_{best} بهترین موقعیت سراسری اجتماع در مراحل قبل است. موقعیت جدید ذره i ام (X_t^i) با اضافه کردن سرعت محاسبه شده برای آن ذره در گام قبلی (V_t^i) به موقعیت مرحله قبل ذره (X_t^{i-1}) مطابق رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$X_t^i = X_t^{i-1} + V_t^i \quad (13)$$

در این مرحله همچنین بررسی می‌گردد که موقعیت جدید ذره در محدوده کرانه‌های مجاز باشد، در غیر این صورت مولفه یا مولفه‌های تخطی کرده از کرانه‌ها به داخل فضای جستجو بازگردانده شده و مولفه سرعت متناظر نیز برای ذره مورد نظر، به دلیل برخورد به کرانه‌های فضای جستجو معکوس می‌گردد. ضریب اینرسی یکی از پارامترهای مهم و تعیین کننده رفتار ذره در حصول همگرایی است. هر چند در نسخه اولیه الگوریتم PSO، این ضریب برابر با مقدار ثابت ۱ فرض گردیده است. اما با توجه به اینکه اگر این پارامتر بزرگ انتخاب گردد، به واسطه اینکه فضای نزدیک به نقطه بهینه به دست آمده به خوبی بررسی نمی‌شود، به احتمال بسیار زیاد جواب یافته شده بهترین جواب نیست و از طرف دیگر، اگر این پارامتر کوچک انتخاب شود، قبل از اینکه ذرات کل فضای مسئله را به طور کامل جستجو کرده باشند، تعداد تکرارهای تعیین شده به پایان رسیده و باز هم ذرات قادر به یافتن بهترین جواب نخواهد بود. از مطالب بیان شده مشخص می‌گردد، بهتر است در مراحل ابتدایی ضریب اینرسی بزرگ فرض گردد و با نزدیک شدن به مراحل پایانی تکرارها، مقدار کوچک‌تری برای ضریب اینرسی انتخاب گردد. این نوع انتخاب باعث می‌شود که در ابتدا فضای مسئله به خوبی جستجو شود و به جواب بهینه همگرا شود و در حین همگرایی، فضاهاى مجاور نقطه بهینه به خوبی جستجو گردند. محققین روابط مختلفی را به منظور تعیین دینامیکی ضریب اینرسی در مراحل تکرار، ارائه نموده‌اند در این تحقیق از رابطه ارائه شده توسط شی و ابرهات استفاده می‌گردد.



شکل ۱. الگوریتم APSO

Fig. 1. APSO Algorithm

می‌باشد، r_3 عدد تصادفی با توزیع نرمال استاندارد می‌باشد و j اندیس مربوط به متغیرهای طراحی می‌باشد.

$$x_{ij}^t = \begin{cases} G_{best,j}^{t-1} & \text{if } r_4 > 0.5 \text{ or } j = r_5 \\ x_{ij}^{t-1} + v_{ij}^t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، i و j به ترتیب اندیس نشان دهنده شماره ذره و اندیس مربوط به متغیرهای طراحی می‌باشند. $G_{best,j}^{t-1}$ نشان

(۱۳) انجام می‌شود. اما روند برای ذراتی که در بهترین زیر اجتماع قرار دارند، کمی متفاوت است. محاسبه موقعیت بهترین ذره مرحله قبل توسط رابطه (۱۷) و محاسبه موقعیت سایر ذرات این زیر اجتماع توسط رابطه (۱۸) انجام می‌گیرد.

$$x_{ij}^t = x_{ij}^{t-1} + r_3 x_{ij}^{t-1} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، i اندیس مربوط به بهترین ذره مرحله قبل

جدول ۱. مقایسه نتایج روش تکرار ماتریسی و حل مقادیر ویژه

Table 1. comparison matrix repetition and Eigenvalues methods results

تعداد المان	زمان نسبی حل با روش مقادیر ویژه	زمان نسبی حل با روش تکرار ماتریسی	نسبت زمان ها	فرکانس های ۳ مود اول حاصل از حل مقادیر ویژه	فرکانس های ۳ مود اول حاصل از روش تکرار ماتریسی
۱۰	۵/۴۳	۱	۵/۴۳	۱/۵۵	۱/۵۵
				۹/۱۹	۹/۱۹
				۲۶/۰۹	۲۶/۰۹
۲۰	۱۸/۹۶	۲/۶۸	۷/۰۸	۱/۵۵	۱/۵۵
				۹/۲۴	۹/۲۴
				۲۶/۲۵	۲۶/۲۵
۳۰	۷۷/۹۳	۷/۹۸	۹/۷۷	۱/۵۵	۱/۵۵
				۹/۲۵	۹/۲۵
				۲۶/۲۸	۲۶/۲۸

یک مقدار تصادفی در دامنه [۱ و -۱] است. *noise* نشان دهنده مقدار نویز است و برای فرکانسهای مودال برابر ۰/۱۵ درصد مولفه آام پاسخ تحلیلی سازه خراب در نظر گرفته می شود [۱۵]. تشخیص خرابی مسئله با فرض ۱۰ نویز مختلف حل می گردد و بهترین و بدترین جواب از نظر مطابقت با سازه خراب گزارش می گردد.

با توجه به استفاده از الگوریتم APSO جهت شناسایی محل و شدت خرابی، پارامترهای این الگوریتم شامل ω_{min} ، ω_{max} ، C_1 و C_2 به ترتیب ۰/۴، ۰/۹، ۱/۵ و ۱/۵ فرض می شوند. همچنین تعداد ذرات برابر ۳۰۰ ذره در نظر گرفته می شود. معیار توقف الگوریتم یک معیار مرکب شامل یک معیار خاتمه و یک معیار همگرایی است. معیار همگرایی این گونه است که اگر در ۵ تکرار متوالی اختلاف نتایج بین تکرارهای متوالی از ۱-۷e کمتر شود، الگوریتم متوقف شود و معیار خاتمه تعداد تکرارها را به ۱۰۰ تکرار محدود می کند.

۴-۱- پایه نگهدارنده مخزن آب

اولین مثال بررسی شده در این مقاله پایه نگهدارنده مخزن آب می باشد. شکل ۳ تصویر واقعی و شماتیک این پایه را نشان می دهد.

دهنده متغیر λ از بهترین موقعیت ثبت شده اجتماع در مراحل قبل است. T_4 عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۱ و ۰) است و T_5 یک عدد تصادفی بین ۱ و n (تعداد متغیرهای طراحی) می باشد که برای هر ذره به صورت تصادفی انتخاب می گردد. شکل ۱ روند عملکرد الگوریتم APSO را نشان می دهد.

۴- مسائل عددی

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی در شناسایی خرابی، دو پایه نگه دارنده مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو مثال عددی، جهت شبیه سازی بیشتر با شرایط واقعی و در نظر گرفتن خطاهای ابزارهای آزمایشگاهی جهت برداشت پاسخهای سازه خراب، پاسخهای سازه خراب با در نظر گرفتن مقداری خطا (نویز) بر اساس نتایج مدل تحلیلی، تخمین زده می شوند:

$$R_{ni} = R_i(1 + rand \times noise) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)، R_i مقدار دقیق پاسخ سازه ای آام است. و *rand*

تقسیم سازه به ۲۰۰ المان نشانگر فرکانس های واقعی سازه باشند. فرکانس های طبیعی سازه مربوط به ۵ مود اول، با تقسیم سازه به تعداد المان های مختلف محاسبه گردیده است و جهت ارزیابی دقت فرکانس های محاسبه شده، خطای فرکانس محاسبه شده در مقایسه با مقدار واقعی، توسط رابطه (۲۰) به دست آمده است.

$$er_i = 1/NM \sqrt{\sum_{j=1}^{NM} \left(\frac{\omega_{ij} - \omega_j^{exact}}{\omega_j^{exact}} \right)^2} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، NM نشان دهنده تعداد مودها، ω_{ij} فرکانس مود j ام و ω_j^{exact} مقدار دقیق فرکانس سازه در مود j ام می باشد. نمودار تغییرات میزان خطا در مقابل تعداد المان ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

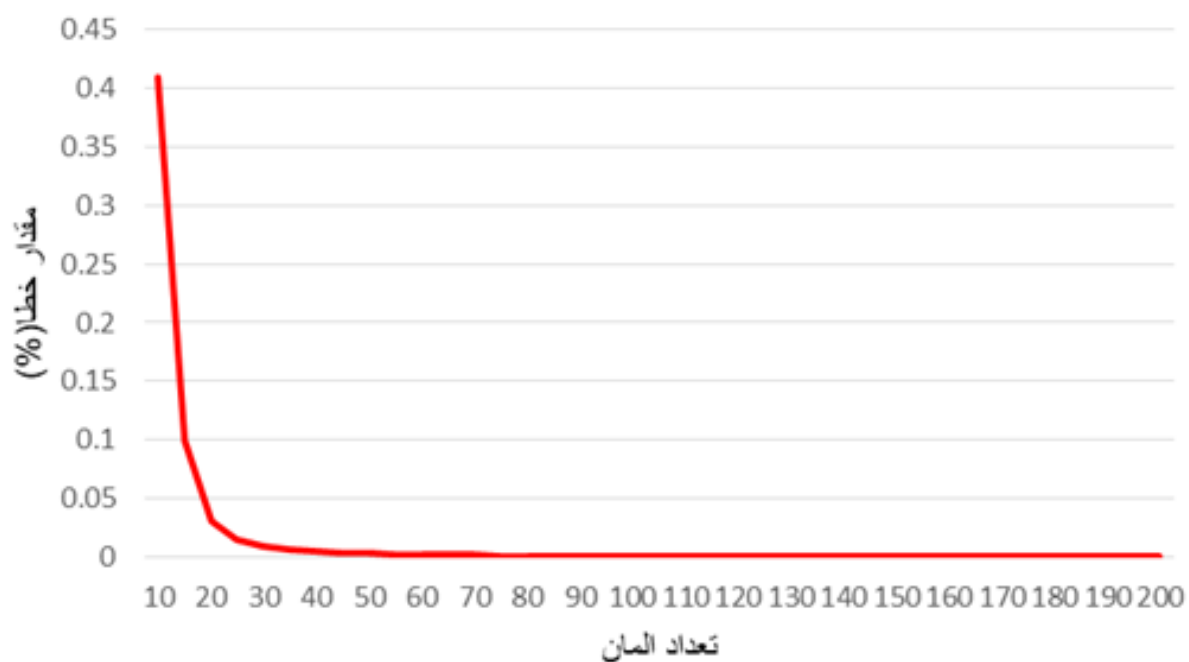
بررسی نمودار شکل ۲، نشان دهنده ی همگرایی و عدم تغییر فرکانس محاسبه شده برای حالتی است که تعداد المان ها بیشتر از ۵۰ المان انتخاب شده اند. بر اساس محاسبات انجام شده، مقدار خطای فرکانس محاسبه شده مربوط به انتخاب ۱۵ المان (حداقل تعداد المان در نظر گرفته شده برای این مثال تشخیص خرابی، در حدود ۰/۰۹٪ است که کمتر از مقدار نویز در نظر گرفته شده برای حل مسائل (۰/۱۵٪) است و در نتیجه اشکالی در تشخیص خرابی به وجود نخواهد آمد.

جهت محاسبه فرکانس به روش اجزای محدود، این پایه نگهدارنده به ۲۵ المان به طول مساوی مطابق شکل ۳ تقسیم گردیده است. برای این مثال ۳ سناریوی خرابی شامل خرابی ۴ و ۲، عضو در نظر گرفته شده است که جزئیات آن در جدول ۲ شرح داده شده است. در شکل های ۴ تا ۶ موقعیت و شدت خرابی المان های خراب واقعی و المان های خراب پیش بینی شده توسط الگوریتم APSO به ترتیب برای سناریوهای خرابی ۱ تا ۳ نشان داده شده است. همچنین برای بررسی دقیق تر و اثبات کارایی الگوریتم، بهترین و بدترین خرابی پیش بینی شده بر اساس ورودی آلوده شده به نویز که توسط الگوریتم گزارش شده است. بر اساس شکل ۶ و ۴ المان های خراب کشف شده توسط الگوریتم برای سناریوی خرابی ۱، المان ۸ و برای سناریوی خرابی ۲، المان های ۲۰ و ۴ و برای سناریوی خرابی ۳، المان های ۲۱، ۲۰، ۴ و ۳ می باشند. از مقایسه این نتایج با داده های جدول

مقطع این پایه لوله ای شکل بوده و قطر آن در ارتفاع کاهش پیدا می کند. قطر داخلی و خارجی آن در پایین مقطع به ترتیب ۱۲۰۰ و ۱۱۷۰ میلی متر و قطر داخلی و خارجی آن در بالای مقطع به ترتیب ۶۰۰ و ۵۷۰ میلی متر است. ضخامت این مقطع در طول ثابت بوده و برابر ۱۵ میلی متر می باشد. طول عضو ۱۰۰۰۰ میلی متر است. جنس این مقطع از فولاد است. مدول الاستیسیته آن برابر 206 GPa و جرم مخصوص آن برابر 7850 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. همچنین جرم مخزن و آب داخل آن برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است.

جهت بررسی صحت مقادیر فرکانسهای به دست آمده از روش تکرار ماتریسی و مقایسه سرعت محاسبات با حل مقادیر ویژه، پایه نگهدارنده ای با مقطع لوله ای شکل و قطر متغیر بررسی گردیده است. این مسئله با تقسیم سازه به ۱۰، ۲۰ و ۳۰ المان با دو روش حل مقادیر ویژه و روش تکرار ماتریسی حل گردیده است. فرکانس های مربوط به ۳ مود اول ارتعاشی به همراه زمان نسبی انجام هر روش در جدول ۱ ارائه گردیده است. در این جدول کمترین زمان برابر با ۱ فرض گردیده است و سایر زمان ها بر حسب آن همپایه شده اند. با مشاهده نتایج، واضح است که فرکانسهای حاصله از دو روش کاملاً بر هم منطبق میباشند و همانطور که انتظار می رفت کاهش بین ۱۰ تا ۲۰ درصدی در زمان محاسبات مربوط به روش تکرار ماتریسی نسبت به زمان محاسبات مربوط به حل مقادیر ویژه مشاهده می گردد. به علاوه هرچه درجات آزادی سیستم بیشتر گردیده است این نسبت کمتر شده است.

از آنجایی که در مسائل تشخیص خرابی، فرکانس های مربوط به سازه خراب به کمک کار آزمایشگاهی و برداشت اطلاعات توسط سنسور انجام می شود، لازم است نشان داده شود که با توجه به تغییر سطح مقطع المان در طول (به واسطه متغیر بودن ممان اینرسی) و فرض میانگین مشخصات المان در حل اجزای محدود، پاسخهای حاصل از روش اجزای محدود منجر به نتیجه ای مشابه کار آزمایشگاهی می گردد. بدین جهت از این استراتژی استفاده گردیده است که در صورت افزایش تعداد المان ها، به دلیل کاهش طول المان و عدم تغییر محسوس سطح مقطع در هر المان، پاسخ فرکانس به دست آمده از روش اجزای محدود با پاسخ برداشت شده از سنسورها یکسان می گردد. فرض شده است که فرکانس های محاسبه شده با



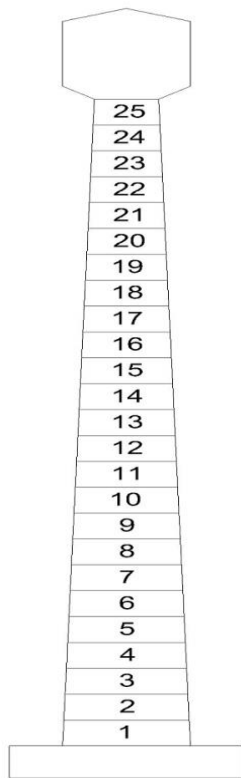
شکل ۲. نمودار درصد خطای فرکانس محاسبه شده نسبت به مقدار واقعی

Fig. 2. percentage error of calculated frequencies to exact frequency

جدول ۲. سناریوهای خرابی برای پایه نگهدارنده مخزن آب

Table 2. Damage scenarios for the water tank taper pole

سناریو ۳		سناریو ۲		سناریو ۱	
درصد خرابی %	شماره عضو	درصد خرابی %	شماره عضو	درصد خرابی %	شماره عضو
۲۵	۳	۲۵	۴	۲۵	۸
۲۵	۴	۳۰	۲۰		
۳۵	۲۰				
۳۵	۲۱				



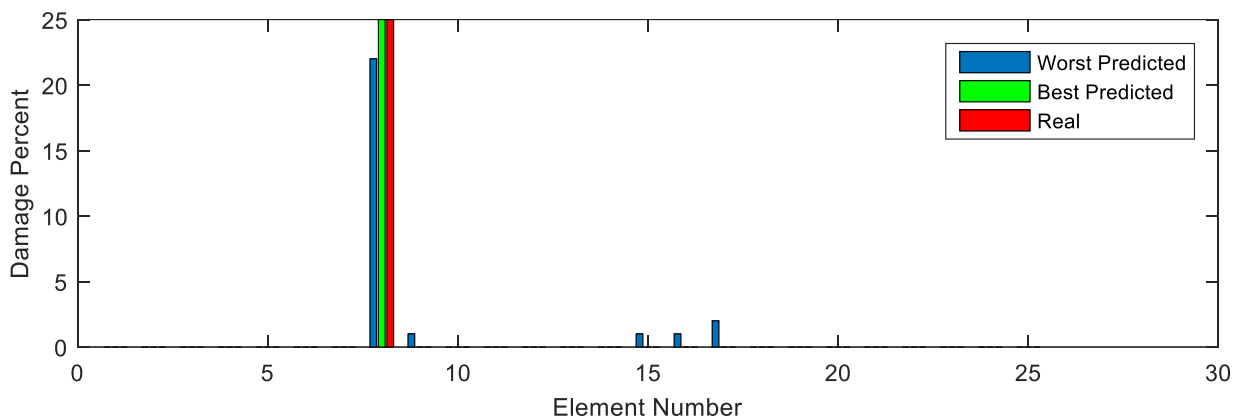
ب) شکل شماتیک



الف) شکل واقعی

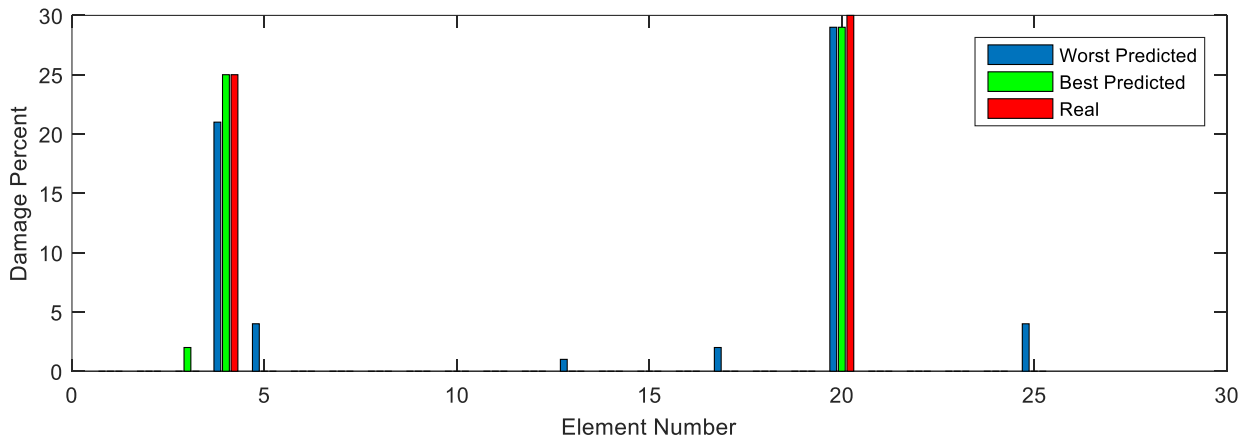
شکل ۳. پایه نگهدارنده مخزن آب

Fig. 3. Water tank taper pole



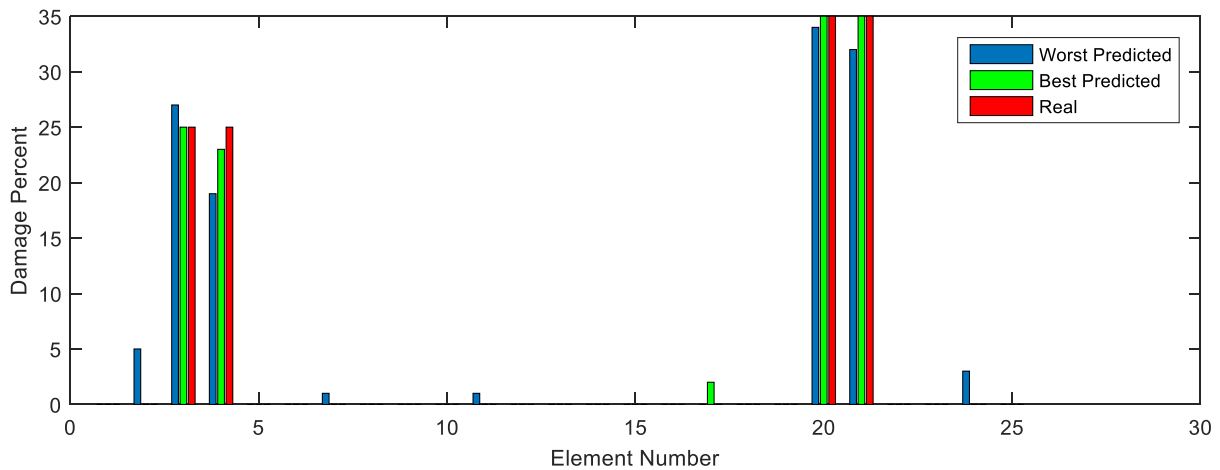
شکل ۴. نتایج ارزیابی خرابی الگوریتم برای سناریو ۱ مربوط به مثال ۱

Fig. 4. Damage detection results of APSO for scenario No.1



شکل ۵. نتایج ارزیابی خرابی الگوریتم برای سناریو ۲ مربوط به مثال ۱

Fig. 5. Damage detection results of APSO for scenario No.2



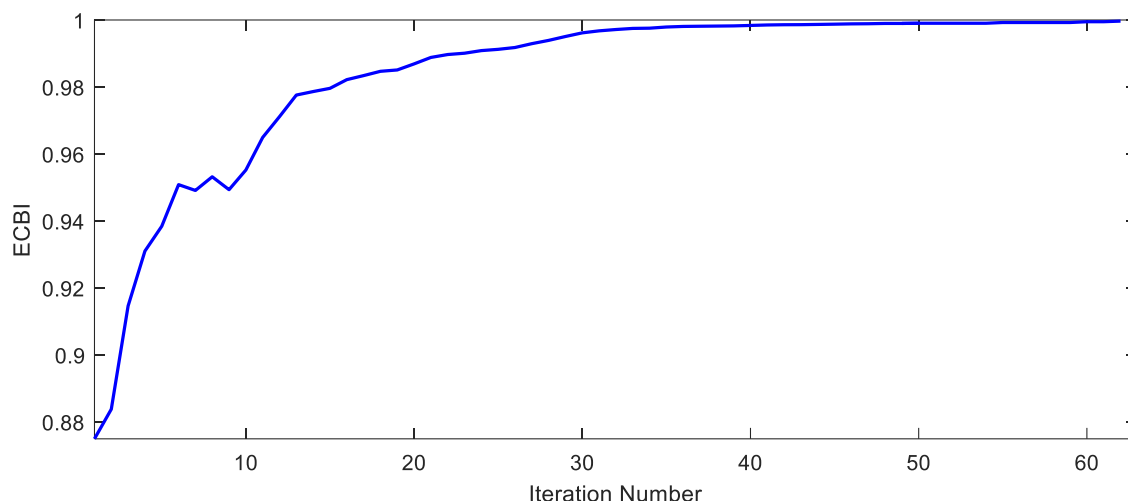
شکل ۶. نتایج ارزیابی خرابی الگوریتم برای سناریو ۳ مربوط به مثال ۱

Fig. 6. Damage detection results of APSO for example 1 scenario No.3

درصد دارند. این موضوع در مورد سایر سناریوها خرابی نیز صادق است. لذا در تمامی سناریوهای خرابی، الگوریتم توانسته است در بدترین شناسایی هم نه تنها تمامی المان‌های خراب واقعی را کشف کند، بلکه شدت خرابی آن‌ها را نیز با درصد خطای جزئی پیش‌بینی کند. تمام المان‌های سالمی هم که در سناریوهای مختلف اشتباها خراب تشخیص داده شده‌اند دارای شدت خرابی کمتر از ۵ درصد می‌باشند که این میزان خطا نیز به دلیل آلوده کردن پاسخ‌ها با نویز قابل اغماض است.

یکی از نمودارهای همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی جهت نمایش

۳ مشخص می‌گردد که المان‌های ۱۷، ۱۶، ۱۵ و ۹ برای سناریوی خرابی ۱ و المان‌های ۲۵، ۱۷، ۱۳، ۵ و ۳ برای سناریوی خرابی ۲ و المان‌های ۲۵، ۱۷، ۱۳، ۵ و ۳ برای سناریوی خرابی ۳ سالم بودند که اشتباها خراب تشخیص داده شده‌اند. اما از آنجایی که درصد خرابی کشف شده برای این المان‌ها با در نظر گرفتن نویز، کمتر از پنج درصد می‌باشد، این خطا قابل چشم‌پوشی است. با رجوع مجدد به شکل ۴ در می‌یابیم که درصد خرابی برای المان‌های خراب واقعی سناریو خرابی ۱ یعنی المان ۸، به ترتیب در برابر ۲۲ و ۲۵ درصد می‌باشند که با مقدار واقعی خرابی در عضو ۸ اختلافی کمتر از ۵



شکل ۷. نمودار همگرایی الگوریتم APSO برای پایه نگهدارنده مخزن آب (سناریو ۲)

Fig. 7. Conversion history of APSO algorithm for water tank taper

جدول ۳. سناریوهای خرابی برای پایه نگهدارنده دوربین مدار بسته

Table 3. Damage scenarios for the CCTV taper pole

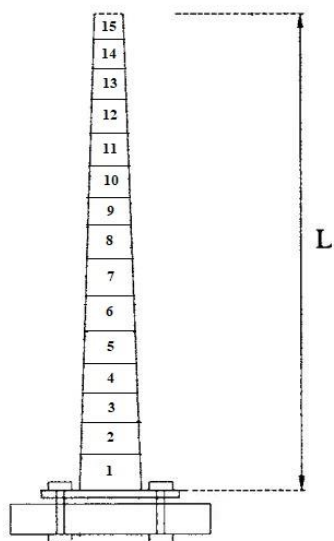
سناریو ۳		سناریو ۲		سناریو ۱	
درصد خرابی	شماره عضو	درصد خرابی	شماره عضو	درصد خرابی %	شماره عضو
۲۰ %	۳	۲۵ %	۲	۲۵ %	۲
۱۰ %	۶	۳۰ %	۱۰		
۳۰ %	۱۱				
۱۵ %	۱۴				

ترتیب ۲۱۵ و ۲۲۱ میلی‌متر و قطر داخلی و خارجی آن در بالای مقطع به ترتیب ۱۲۶ و ۱۳۲ میلی‌متر است. ضخامت این مقطع در طول ثابت بوده و برابر ۳ میلی‌متر می‌باشد. طول عضو ۶۰۹۶ میلی‌متر است. جنس این مقطع از فولاد است. مدول الاستیسیته آن برابر GPa و جرم مخصوص برابر 7850 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. همچنین جرم تجهیزات نظارتی برابر ۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. جهت تحلیل اجزای محدود این پایه نگهدارنده به ۱۵ المان به طول مساوی مطابق شکل ۸ تقسیم

سرعت بالای همگرایی الگوریتم، به عنوان نمونه، در شکل ۷ نشان داده شده است.

۴-۲- پایه نگهدارنده دوربین مدار بسته

دومین مثال بررسی شده در این مقاله، پایه نگهدارنده دوربین مدار بسته پلیس می‌باشد. شکل ۸ تصویر واقعی و شماتیک این پایه را نشان می‌دهد. مقطع این پایه لوله‌ای شکل بوده و قطر آن در ارتفاع کاهش پیدا می‌کند. قطر داخلی و خارجی آن در پایین مقطع به



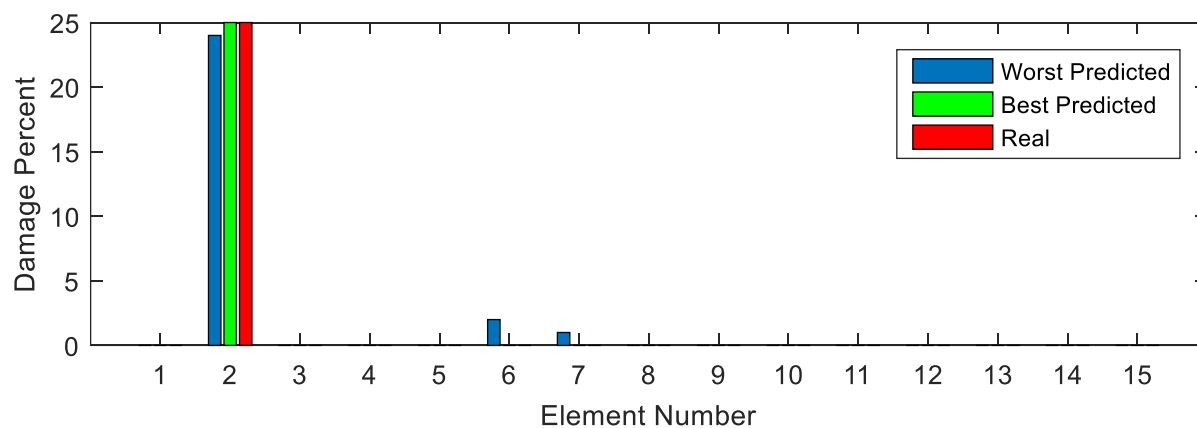
(ب) شکل شماتیک [16]



(الف) شکل واقعی

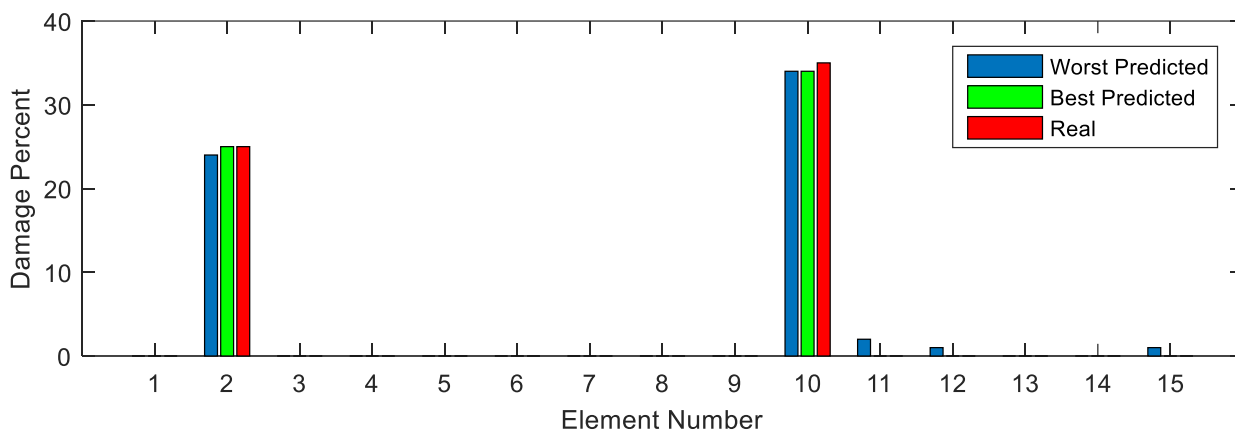
شکل ۸. پایه نگهدارنده دوربین مدار بسته

Fig. 8. Surveillance camera holder base



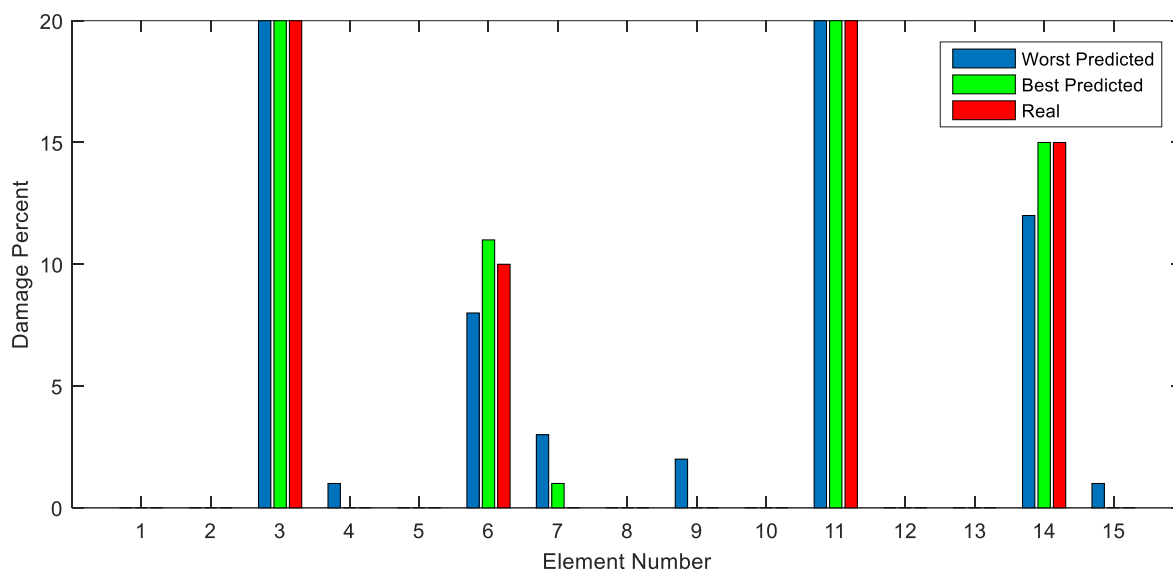
شکل ۹. نتایج ارزیابی خرابی الگوریتم برای سناریو ۱ مربوط به مثال ۲

Fig. 9. Damage detection results of APSO for scenario No.1



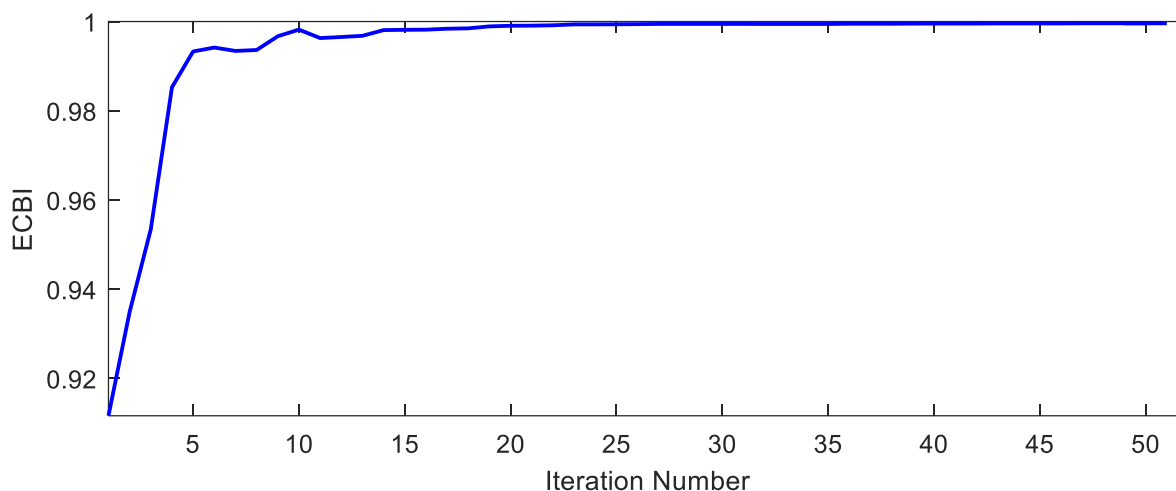
شکل ۱۰. نتایج ارزیابی خرابی الگوریتم برای سناریو ۲ مربوط به مثال ۲

Fig. 10. Damage detection results of APSO for scenario No.2



شکل ۱۱. نتایج ارزیابی خرابی الگوریتم برای سناریو ۳ مربوط به مثال ۲

Fig. 11. Damage detection results of APSO for scenario No.3



شکل ۱۲. نمودار همگرایی الگوریتم APSO برای پایه نگهدارنده دوربین مدار بسته (سناریو ۳)

Fig. 12. Conversion history of APSO algorithm for CCTV

است در بدترین شناسایی هم نه تنها تمامی المان‌های خراب واقعی را کشف کند، بلکه شدت خرابی آن‌ها را نیز با درصد خطای جزئی پیش‌بینی کند. تمام المان‌های سالمی هم که در سناریوهای مختلف اشتباها خراب تشخیص داده شده‌اند دارای شدت خرابی کمتر از ۵ درصد می‌باشند که این میزان خطا نیز به دلیل آلوده کردن پاسخ‌ها با نویز قابل اغماض است. یکی از نمودارهای همگرایی الگوریتم بهینه سازی جهت نمایش سرعت بالای همگرایی الگوریتم، به عنوان نمونه، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله جهت تشخیص خرابی پایه‌های نگهدارنده با ممان اینرسی متغیر از یک روش مبتنی بر فرکانس‌های طبیعی استفاده شده است. جهت محاسبه فرکانس طبیعی سازه از روش تکرار ماتریسی استفاده گردید که با توجه به روشهای مشابه، سرعت و دقت بسیار بالایی در محاسبه فرکانسهای سازه دارد و سرعت محاسبه فرکانس را نسبت به روش حل مقادیر ویژه در حدود ۷ برابر افزایش داد. همچنین برای تحلیل پایه با ممان اینرسی متغیر از معادلسازی هر قسمت با ممان اینرسی متوسط استفاده گردیده است. از آنجایی

شده است.

برای این مثال، ۳ سناریوی خرابی شامل خرابی ۲، ۴ و ۱ عضو در نظر گرفته می‌شود که جزئیات آن در جدول ۳ شرح داده شده است. در اشکال ۹ تا ۱۱ موقعیت و شدت خرابی المان‌های خراب واقعی و المان‌های خراب پیش‌بینی شده توسط الگوریتم APSO به ترتیب برای سناریوهای خرابی ۱ تا ۳ نشان داده شده است. همانطور که گفته شد؛ مسئله برای هر سناریوی خرابی به ازای ایجاد ۱۰ نویز تصادفی مختلف در فرکانسهای مربوط به سازه خراب حل گشته است. برای بررسی دقیق‌تر و اثبات کارایی الگوریتم از میان پاسخ‌های به دست آمده، بهترین و بدترین خرابی پیش‌بینی شده بر اساس ورودیهای آلوده به نویز در این اشکال گزارش شده است. تخمین خرابی که بیش‌ترین تطابق با سناریوی خرابی در نظر گرفته شده را دارد، بهترین خرابی پیش‌بینی شده می‌باشد و تخمین خرابی که کمترین تطابق با سناریوی خرابی در نظر گرفته شده را دارد، بدترین خرابی پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف معناداری بین بهترین و بدترین خرابی پیش‌بینی شده وجود ندارد و خطاهای ناشی از برداشت آزمایشگاهی (نویز) نمی‌تواند از کارایی روش پیشنهادی بکاهد. در تمامی سناریوهای خرابی، الگوریتم توانسته

- detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm, *Mathematical and Computer Modelling*, 1809-1798 (2011) (9)53.
- [4] R. Perera, R.J.J.o.S.E. Torres, Structural damage detection via modal data with genetic algorithms, (2006) (9)132 1501-1491.
- [5] S. Sandesh, K.J.I.Pi.S. Shankar, Engineering, F.I.Pi. Engineering, Application of a hybrid of particle swarm and genetic algorithm for structural damage detection, 1021-997 (2010) (7)18.
- [6] F. Kang, J.-J. Li, Q.J.A.S.C. Xu, Damage detection based on improved particle swarm optimization using vibration data, 2335-2329 (2012) (8)12.
- [7] M. Nobahari, M.R. Ghasemi, N.J.S.S.S. Shabakhty, A novel heuristic search algorithm for optimization with application to structural damage identification, (4)19 461-449 (2017).
- [8] S. Eslami, F. Abdollahi, J. Shahmiri, S. Tavakkoli, Structural damage detection by using topology optimization for plane stress problems, *J Iran University of Science Technology*, 176-159 (2019) (1)9.
- [9] M. Nobahari, M. Ghasemi, N.J.A.M.M. Shabakhty, A fast and robust method for damage detection of truss structures, 382-368 (2019) 68.
- [10] A.K. Chopra, *Dynamics of structures theory and*, 2012.
- [11] Z.-Q. QU, Z.-F.J.M.S. Fu, S. Processing, An iterative method for dynamic condensation of structural matrices, 678-667 (2000) (4)14.
- [12] S.-H. Boo, P.-S.J.C. Lee, Structures, An iterative algebraic dynamic condensation method and its performance, 182 429-419 (2017).
- [13] M. Ali, P.J.A.m. Kaelo, computation, Improved particle swarm algorithms for global optimization, (2008) (2)196 593-578.
- [14] Y. Tian, D. Liu, An Improved Particle Swarm Algorithms for Global Optimization, in: 2010 International Conference on Machine Vision and Human-machine Interface, IEEE, 2010, pp. 141-138.
- [15] A. Messina, I. Jones, E. Williams, Damage detection and localization using natural frequency changes, in:

که گسسته سازی و انتخاب این روش موجب بروز خطا در محاسبات می‌گردد، حساسیت فرکانسهای محاسبه شده به تعداد المان بررسی گردید. بر اساس محاسبات انجام شده مشخص شد، مقدار خطای فرکانس محاسبه شده مربوط به انتخاب ۱۵ المان (حداقل تعداد المان در نظر گرفته شده برای مثالهای تشخیص خرابی)، در حدود ۰/۰۹٪ است که کمتر از مقدار نویز در نظر گرفته شده برای حل مسائل است و در نتیجه اشکالی در تشخیص خرابی به وجود نخواهد آمد. جهت شناسایی موقعیت و شدت المان‌های خراب از الگوریتم فرااکتشافی APSO استفاده گردید که عملکرد مناسبی برای شناسایی اعضای خراب از خود نشان داد. به منظور سنجش کارایی روش مذکور دو مثال عددی با سناریوهای خرابی مختلف بررسی شد. برای مطابقت هر چه بیشتر مدل سازی با واقعیت، خطای اندازه‌گیری به صورت نویز در فرکانسهای محاسبه شده در حل مسائل لحاظ شد. در همه سناریوهای خرابی الگوریتم APSO، علی‌رغم پیچیدگی برخی از آن‌ها، توانست تمام المان‌های خراب واقعی را حتی در بدترین شناسایی خود نیز به درستی پیدا کند و شدت خرابی آن‌ها را با درصد خطای ناچیزی پیش‌بینی نماید. علاوه بر این، تمام المان‌های سالمی که در برخی از سناریوهای خرابی اشتباهاً خراب شناسایی شدند دارای شدت خرابی کمتر از ۵ درصد بودند که به دلیل در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری، این مقدار خطا قابل اغماض هست. با توجه به مثالهای حل شده، روش پیشنهاد شده قدرت یافتن خرابیهای با شدت کم (۱۰ الی ۱۵ درصد) را نیز دارا می‌باشد. به استناد این نتایج می‌توان چنین استنباط کرد که روش پیشنهادی برای تشخیص خرابی پایه‌های نگهدارنده با ممان اینرسی متغیر کاملاً کارا و توانمند است و قابلیت استفاده برای دیگر سازه‌ها را نیز دارد.

۶- مراجع

- [1] M. Pedram, M. Khedmati, A. Esfandiari, H. Kazem, Damage detection in dolphin platform of a wharf by finite element model updating, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 71-80 (2019) (51)3.
- [2] E. Darvishan, Damage detection of cable-stayed bridges using frequency domain analysis and clustering, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2018).
- [3] M. Nobahari, S.M. Seyedpoor, Structural damage

analysis of tapered steel and fiber-reinforced plastic bridge
camera poles, 617-611 (2006) (5)11.

Proceedings of conference on Identification in Engineering
Systems, 1996, pp. 76-67.

[16] J. Jung, A. Abolmaali, Y.J.J.o.B.E. Choi, Finite-element

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Ghohani Arab, A. Mahallati Rayeni, A. Naderi, M. R. Sohrabi, M. R. Ghasemi, *Damage Detection of Single Tapered Poles Using APSO Algorithm. Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2297-2314*

DOI: [10.22060/ceej.2020.17377.6542](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17377.6542)

