

شناسایی خرابی در اتصال‌های تیر به ستون قاب‌های خمشی تحت بار ضرب‌به‌ی با استفاده از یک روش بهینه‌سازی

نرگس بهنایی (کارشناس ارشد)

سید محمد سیدپور* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل

در نوشتار حاضر، یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی، جهت شناسایی خرابی در اتصال‌های قاب‌های خمشی تحت بار ضرب‌به‌ی ارائه شده است. ابتدا اتصال‌های تیر به ستون در قاب خمشی با فنرهای پیچشی فاقد طول مدل شدند. سپس یک ضریب صلابت در هر اتصال تعریف شده است. در ادامه، مسئله‌ی شناسایی خرابی در اتصال به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی استاندارد تبدیل شده است که برای تعریف تابع هدف در بهینه‌سازی، از شتاب‌های گره‌ی سازه‌ی آسیب دیده و شتاب‌های تحلیلی به دست آمده از روش نیومارک استفاده شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی موردنظر با استفاده از الگوریتم تکامل تقاضایی بهبود یافته^۱ برای تشخیص آسیب حل شد. به منظور بررسی کارایی و همچنین بررسی اثر محل حسگرها در روش پیشنهادی، دو مثال عددی ارائه شدند و نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی، محل و شدت خرابی در اتصال‌ها را به خوبی شناسایی می‌کند. همچنین جانمایی حسگرها در محل مناسب، تأثیر به‌سزایی در شناسایی خرابی دارد.

واژگان کلیدی: شناسایی خرابی، اتصال‌های تیر به ستون، پاسخ‌های حوزه‌ی زمان، الگوریتم بهینه‌سازی.

۱. مقدمه

وقوع خرابی در سیستم‌های سازه‌ی و اعضاء بحرانی آن‌ها در طول عمر سازه، امری اجتناب‌ناپذیر است. اگر خرابی در سیستم‌های سازه‌ی به طریقی قابل شناسایی باشد، می‌توان با تعمیر یا تعویض المان‌های آسیب دیده از ایجاد خرابی‌های کلی در سازه جلوگیری کرد.^[۱] طی سال‌های اخیر، بیشتر روش‌های شناسایی خرابی ایجاد شده، بر خرابی در اعضاء سازه‌ی تمرکز داشته و عموماً از خرابی در اتصال‌های سازه‌ها غافل بوده و در مورد آن مطالعات کمتری انجام شده است. از ویژگی‌های قاب خمشی، نقش مهم اتصال‌ها در آن است؛ زیرا عملکرد سازه‌های مذکور تا حد بسیار زیادی به سختی و مقاومت اتصال‌های تیر به ستون بستگی دارد. وقوع خرابی در قاب‌های خمشی، سبب تغییر در مشخصات سختی، جرم، میرایی و در نتیجه پاسخ‌های دینامیکی، از جمله شتاب سازه خواهد شد که از همین نکته می‌توان به‌عنوان راهی برای شناسایی خرابی در اتصال‌های سازه‌ها استفاده کرد. یکی از شاخص‌ها برای تشخیص خرابی، استفاده از پاسخ‌های دینامیکی در حوزه‌ی زمان هستند که مستقیماً و با هزینه‌ی کمتر در مقایسه با سایر پاسخ‌های دینامیکی قابل اندازه‌گیری هستند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۳۱، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2018.2231.2142

در پژوهشی در سال ۱۹۹۸، با استفاده از ترکیب دو روش تغییر پارامتر تقریبی (APC)^۲ و تطبیق اثر آسیب (DSM)^۳ و همچنین بهره‌گیری از پارامترهای مودال، خرابی در اتصال‌های سازه شناسایی شد. نتایج نشان داد که روش ترکیبی ذکر شده به خوبی محل آسیب‌های تکی و چندگانه را شناسایی می‌کند، اما دقیقاً مقدار خرابی را نشان نمی‌دهد.^[۱] همچنین در سال ۲۰۰۱، با استفاده از شبکه‌های عصبی و اندازه‌گیری پارامترهای مودال، شدت و مکان خرابی در اتصال‌های قاب‌های فولادی تشخیص داده شد. در روش مذکور، تمام اتصال‌ها تبدیل به فنرهای فاقد طول شدند و آسیب با استفاده از کاهش در سختی دورانی اتصال مدل شد. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی دقت روش پیشنهادی در شناسایی خرابی در اتصال‌ها بود.^[۲] در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۶، روشی مبتنی بر المان طیفی و بهره‌گیری از حسگرهای پیزوالکتریک (PZT)^۴ برای شناسایی محل و شدت خرابی پیشنهاد شد که در آن آسیب با استفاده از شل کردن پیچ‌های اتصال شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که محل آسیب با دقت قابل قبولی شناسایی شده است، اما شدت آسیب به محل قرارگیری حسگرهای پیزوالکتریک و تعداد آن‌ها بستگی دارد.^[۴] همچنین در سال ۲۰۰۹، از تغییرات در بسامد و شکل‌های مودی سازه و یک روش بهینه‌سازی به‌عنوان راهی برای شناسایی خرابی در اتصال‌های قاب فولادی استفاده شده است. اتصال‌ها توسط فنرهای پیچشی فاقد طول مدل و آسیب‌ها با استفاده از کاهش

مفصلی در نظر گرفته می‌شوند. در صورتی که در واقعیت، بیشتر اتصال‌ها، ظرفیت لحظه‌یی بین دو حالت ذکر شده را دارند. در نوشتار حاضر، اتصال‌ها به روش مدل مکانیکی مدل‌سازی شده‌اند که مبتنی بر شبیه‌سازی گره یا اتصال با استفاده از المان‌های انعطاف‌پذیر (فنر) است. با روش مدل مکانیکی، تمام اتصال‌های صلب تبدیل به اتصال‌های نیمه‌صلب می‌شوند. شکل ۱، طرح شماتیک اتصال نیمه‌صلب تیر به ستون را نشان می‌دهد.^[۹]

با استفاده از مدل مذکور، تمام اتصال‌ها با فنرهای پیچشی فاقد طول مدل می‌شوند، سپس یک ضریب صلبیت انتهایی در هر اتصال تعریف می‌شود که مرتبط با سختی خمشی عضو El/L و سختی فنر پیچشی K است.^[۱۰]

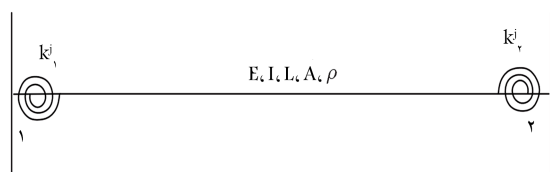
$$P_i = \frac{1}{1 + \frac{\gamma EI}{LK_i}} \quad (1)$$

که در آن، متغیر $(i = 1, 2)$ بیانگر دو انتهای عضو و Z بیانگر اتصال^۸ است. مقدار تئوری P_i بین ۰ تا ۱ است، که مقدار ۰ مربوط به اتصال مفصلی و مقدار ۱ مربوط به اتصال کاملاً صلب است. بنابراین یک عضو نیمه‌صلب، ضریب صلبیت انتهایی بین ۰ و ۱ دارد که از این مفهوم جهت شناسایی آسیب در قاب خمشی با اتصال صلب استفاده می‌شود. به این صورت که اگر در یک سازه با اتصال صلب، مقدار P از ۱ کمتر شود، دیگر اتصال صلب نیست و اتصال دچار خرابی شده است. سختی دورانی اتصال نیمه‌صلب مرتبط با سختی خمشی تیر از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$K_i = \gamma \frac{EL}{L} \quad (2)$$

که در آن، K_i سختی دورانی اتصال نیمه‌صلب، E ، I و L به ترتیب مدول کشسانی، ممان اینرسی و طول المان تیر و همچنین γ یک ضریب تناسب هستند.

اگر ضرایب صلبیت انتهایی برای هر اتصال، P_e و P_f باشند، ماتریس جرم یک المان قاب با اتصال‌های نیمه‌صلب از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید.^[۱۱] که در آن، \bar{m} جرم واحد طول و اندیس‌های f و e نشان‌دهنده‌ی دو سر ابتدایی^۹ و انتهایی^{۱۰} تیر و ستون هستند. روابط f_i ها نیز از نوشتاری در سال ۲۰۰۴^[۱۲] به دست می‌آیند. ماتریس سختی یک المان قاب نیز با در نظر گرفتن اتصال‌های نیمه‌صلب از رابطه‌ی ۴



شکل ۱. طرح شماتیک اتصال نیمه‌صلب تیر به ستون.

سختی دورانی اتصال شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان‌دهنده‌ی دقت روش پیشنهادی در یافتن محل و شدت خرابی بود.^[۵] برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۱۰، با استفاده از حسگرهای خوشه‌یی متراکم، آسیب‌های محلی در اتصال‌های تیر به ستون را با دقت خوبی شناسایی کردند.^[۶]

در پژوهش دیگری در همان سال، روشی جهت شناسایی مکان و وسعت خرابی در اتصال‌ها ارائه شد، که در آن از تغییرات بسامد و یک الگوریتم تکرارشونده جهت شناسایی خرابی استفاده شد که با درصد خطای کم توانست خرابی را شناسایی کند.^[۷] در سال ۲۰۱۲، نیز با بهره‌گیری از تحلیل مودال و روش مدل استنتاجی بایسین کالیبره شده^۵ به شناسایی خرابی در اتصال‌های قاب فولادی پرداخته و آسیب در قالب حذف برخی از مفصل‌های اتصال قاب مدل شد. همچنین از خواص مودال سازه (تغییرات در ۴ مود اول بسامدهای طبیعی) و نیز کاهش سختی دورانی اتصال (کاهش ۳۹ درصدی ضریب صلبیت اتصال) برای شناسایی مکان خرابی استفاده شده است.^[۸] در سال ۲۰۱۴، نیز با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۶ و پارامترهای مودال سازه (شکل‌های مودی و بسامدهای طبیعی)، میزان آسیب در اتصال‌های قاب‌های فولادی با دقت قابل قبولی برآورد شده است.^[۹] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۶، از روش استنتاجی بایسین و کاهش مدل المان محدودی به منظور شناسایی محل خرابی در اتصال‌های پیچی قاب فولادی استفاده و آسیب با استفاده از شل‌کردن پیچ‌های برخی اتصال‌های تیر به ستون مدل شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی دقت روش پیشنهادی در شناسایی مکان خرابی بود.^[۱۰] هدف از مطالعه‌ی حاضر، شناسایی محل و شدت خرابی در اتصال‌های قاب‌های خمشی با استفاده از کمینه‌ی پاسخ‌های دینامیکی سازه است. بدین منظور از اصول دینامیک سازه و اجزاء محدود استفاده شده است. ابتدا مسئله‌ی شناسایی خرابی در اتصال، به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده است، که در آن از پاسخ‌های حوزه‌ی زمان سازه (شتاب در نقاط گره‌یی)، برای تعریف تابع هدف در بهینه‌سازی استفاده شده است. همچنین شبیه‌سازی اتصال‌ها با استفاده از فنرهای فاقد طول در محیط نرم افزار متلب^۷ صورت گرفته و از روش نیومارک جهت تعیین شتاب سازه استفاده شده است. سپس با به‌کارگیری الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته جهت حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، محل و شدت آسیب‌های تکی و چندگانه با دقت بالایی در اتصال‌ها تعیین شده است. همچنین در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر محل قرارگیری حسگر در شناسایی خرابی نیز بررسی شده است.

۲. مدل‌سازی اتصال‌ها

یکی از حساس‌ترین قسمت‌های یک سازه‌ی قاب فولادی، اتصال‌های تیر به ستون آن است. اتصال‌های مذکور در قاب‌های فولادی عموماً یا به صورت کاملاً صلب یا

$$M^e = \frac{\bar{m}L}{12 \cdot D^2} \begin{bmatrix} 14 \cdot D^2 & & & & & \\ \circ & 4 f_1(P_e, P_f) & & & & \\ \circ & 2 L f_2(P_e, P_f) & 4 L^2 f_5(P_e, P_f) & & & \\ 14 \cdot D^2 & & & & 14 \cdot D^2 & \\ \circ & 2 f_7(P_e, P_f) & L f_2(P_f, P_e) & & \circ & 4 f_1(P_f, P_e) \\ \circ & -L f_2(P_e, P_f) & -L^2 f_6(P_e, P_f) & & \circ & -2 L f_2(P_f, P_e) \quad 4 L^2 f_5(P_f, P_e) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K^e = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} A/I & & & & & \\ \circ & \frac{2(B_{11}+B_{12}+B_{22})}{L^2} & & & & \\ \circ & \frac{2(B_{11}+B_{12})}{L} & 2B_{11} & & & \\ -A/I & \circ & \circ & A/I & & \\ \circ & \frac{-2(B_{11}+B_{12}+B_{22})}{L^2} & \frac{-2(B_{11}+B_{12})}{L} & \circ & \frac{2(B_{11}+B_{12}+B_{22})}{L^2} & \\ \circ & \frac{2(B_{12}+2B_{22})}{L} & 2B_{12} & \circ & \frac{-2(B_{12}+2B_{22})}{L} & 2B_{22} \end{bmatrix} \quad \text{Symmetric} \quad (4)$$

به دست می‌آید.^[۱۲،۱۱] که در آن B_{11} و B_{12} ، B_{22} از رابطه‌های ۵ به دست می‌آیند:

$$B_{11} = \frac{3P_e}{4 - P_e P_f}, B_{12} = \frac{3P_e P_f}{4 - P_e P_f}, B_{22} = \frac{3P_f}{4 - P_e P_f} \quad (5)$$

به علت محدود بودن اطلاعات، روش میرایی رایلی، مؤثرترین و کارآمدترین روش جهت یافتن میرایی سازه است که طبق معادله‌ی ۶ به دست می‌آید:^[۱۳]

$$[C] = \alpha_0 [M] + \alpha_1 [K] \quad (6)$$

که در آن، $[C]$ ، $[M]$ ، $[K]$ ماتریس‌های به ترتیب معرف ماتریس میرایی، ماتریس جرم و ماتریس سختی سازه هستند. همچنین α_0 و α_1 پارامترهای ضرایب رایلی هستند و α_0 و α_1 از معادله‌های ۷ و ۸ به دست می‌آیند:

$$\alpha_0 = \frac{2\xi(\omega_1\omega_2)}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (7)$$

$$\alpha_1 = \frac{2\xi}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad (8)$$

که در آن‌ها، ξ نسبت میرایی، ω_1 و ω_2 بسامدهای زاویه‌ی در مودهای اول و دوم سازه‌ی موردنظر هستند. میرایی در مطالعه‌ی حاضر، ۵٪ در نظر گرفته شده است.

۳. تحلیل دینامیکی قاب با اتصال نیمه‌صلب

در نوشتار حاضر، جهت شناسایی خرابی از شتاب در نقاط گره‌ی استفاده شده است که مستقیماً و با هزینه‌ی کمتر در مقایسه با سایر پاسخ‌های دینامیکی قابل اندازه‌گیری است. برای به دست آوردن پاسخ‌ها در حوزه‌ی زمان، نیاز به حل معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم حاکم بر رفتار دینامیکی سازه‌های چند درجه‌ی آزادی مطابق رابطه‌ی ۹ است:^[۱۳]

$$[M]\ddot{X}(t) + [C]\dot{X}(t) + [K]X(t) = F(t) \quad (9)$$

که در آن، $F(t)$ نیروی وارده به سازه است و $\ddot{X}(t)$ ، $\dot{X}(t)$ و $X(t)$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی سازه در لحظه‌ی t هستند. روش‌های گوناگونی جهت حل معادله‌ی دینامیکی و محاسبه‌ی مؤلفه‌های جابه‌جایی، سرعت و شتاب توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. در نوشتار حاضر، برای حل معادله‌ی ۹ از روش نیومارک به دلیل خطای کمتر نسبت به سایر روش‌ها استفاده شده است. برای به دست آوردن جابه‌جایی در روش نیومارک، از رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌شود:

$$X_{n+1} = K_e^{-1} \cdot F_e \quad (10)$$

$$K_e = \alpha_0 M + \alpha_1 C + K \quad (11)$$

$$F_e = F + M(\alpha_0 \dot{X}_n - \alpha_1 \ddot{X}_n - \alpha_2 \ddot{X}_n) + C(\alpha_1 \dot{X}_n - \alpha_2 \ddot{X}_n - \alpha_3 \ddot{X}_n) \quad (12)$$

حال برای به دست آوردن بردار شتاب از رابطه‌ی ۱۳ استفاده می‌شود:

$$\ddot{X}_{n+1} = \alpha_0 (\dot{X}_{n+1} - \dot{X}_n) - \alpha_1 \ddot{X}_n - \alpha_2 \ddot{X}_n \quad (13)$$

که در آن، ضرایب نیومارک از نوشتاری در سال ۱۹۹۳، به دست می‌آیند.^[۱۳]

۴. شناسایی خرابی به روش بهینه‌سازی

هدف از پژوهش حاضر، شناسایی خرابی در اتصال‌های قاب‌های خمشی به وسیله‌ی یک روش بهینه‌سازی است. شکل کلی مسئله‌ی بهینه‌سازی مربوط به شناسایی خرابی به صورت رابطه‌ی ۱۴ تعریف می‌شود:^[۱۴]

$$Find : X^T = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

$$Minimize : W(X)$$

$$X^l \leq X \leq X^u \quad (14)$$

که در آن، X بردار متغیر خرابی شامل مکان و شدت خرابی‌های نامعلوم است، X^l و X^u حد پایین و بالای بردار خرابی هستند و W تابع هدف است که باید کمینه شود.

۱.۴. متغیر خرابی

در مطالعه‌ی حاضر، شدت آسیب اتصال در هر نقطه‌ی i به صورت کاهش نسبت ضریب صلبیت انتهایی محل آسیب دیده به ضریب صلبیت انتهایی همان نقطه در حالت سالم تعریف شده است (رابطه‌ی ۱۵):

$$x_i = 1 - \frac{P_{ix}}{P_{ih}}, \quad i = 1, 2 \quad (15)$$

که در آن، P_{ix} و P_{ih} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ضریب صلبیت انتهایی در شرایط آسیب‌دیده و سالم هستند. با فرض $P_{ih} = 1$ میزان x_i از ۰ تا ۱ متغیر است. مقدار ۰، برای شرایط سالم و مقدار ۱، برای شرایط کاملاً آسیب‌دیده کاربرد دارد.

۲.۴. تابع هدف

تابع هدف، معیاری است که به وسیله آن مقدار هم‌گرایی الگوریتم و زمان توقف اجرای الگوریتم مشخص می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، تابع هدف مورد استفاده از طریق رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شود:

$$W(X) = -\frac{1}{\gamma} \left(\frac{|a_d^T \cdot a(X)|^2}{(a_d^T \cdot d)(a(X)^T \cdot a(X))} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{nm} \frac{\min |(a_{xi}, a_{di})|}{\max |(a_{xi}, a_{di})|} \right) \quad (16)$$

که در آن، a_d بردار شتاب سازه‌ی آسیب دیده، $a(X)$ بردار شتاب مدل تحلیلی و nm تعداد مؤلفه‌های بردار شتاب هستند. در صورت استفاده از پاسخ‌های شتاب بیش از ۱ گره از سازه، بردارهای شتاب گره‌یی، به صورت یک بردار ستونی واحد در نظر گرفته خواهند شد.

اکنون مسئله‌ی شناسایی خرابی به شکل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی استاندارد تبدیل شده است. حال باید با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب، تابع مذکور کمینه شود، تا موقعیت و مقدار خرابی در اتصال به دست آید. در پژوهش حاضر، از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته برای حل مسئله‌ی شناسایی خرابی استفاده شده است.

۳.۴. الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) [۱۱]، یک راهبرد احتمالی مبتنی بر جمعیت است که رفتاری تصادفی دارد و با استفاده از یک سری حل پیشنهادی، فرایند بهینه‌سازی آغاز و نتیجه در طی تکرارهای متوالی به دست می‌آید. جهت شروع به کار الگوریتم، فقط به ۳ پارامتر کنترلی نیازمند است که عبارت‌اند از: NP اندازه‌ی جمعیت یا نسل اولیه، mf ضریب جهش (پارامتر کنترل کننده‌ی جهش) و cr درصد احتمال امکان جهش در هر تکرار (پارامتر کنترل کننده‌ی تقاطع). فرایند عمومی الگوریتم تکامل تفاضلی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. [۱۵]

برای ایجاد جمعیت اولیه، ابتدا مرز پایینی x_j^l و بالایی x_j^u برای هر متغیر معرفی می‌شوند. سپس جمعیت اولیه به طور تصادفی در محدوده‌ی $[x_j^l, x_j^u]$ تولید می‌شود. به ازاء هر بردار معلوم، $X_{i,G}$ از نسل G ام، سه بردار $X_{r1,G}$ ، $X_{r2,G}$ و $X_{r3,G}$ به طور تصادفی از میان جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند، به طوری که r_1, r_2 و r_3 باید با یکدیگر و با i متفاوت باشند. با استفاده از جمعیت مذکور، بردار جهش یافته‌ی

$V_{i,G+1}$ تولید می‌شود. [۱۶] لذا از عملگرهای تقاطع و انتخاب برای تولید نسل جدید استفاده شده و این فرایند تا حصول هم‌گرایی ادامه یافته است.

۴.۴. الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته

سه پارامتر مهم در الگوریتم بهینه‌سازی DE، اندازه‌ی جمعیت، ضریب جهش، و ضریب تقاطع هستند که انتخاب بهترین گزینه برای هر یک می‌تواند در کارایی (دقت، قدرت و سرعت) الگوریتم DE مؤثر باشد. در مطالعه‌ی حاضر، برای تولید نسل جدید و با هدف بالا بردن کارایی الگوریتم، از بردار جهش متفاوتی استفاده شده است (رابطه‌ی ۱۷): [۱۷]

$$V_{i,G+1} = \begin{cases} X_{r1,G} + mf(X_{r2,G} - X_{r3,G}) & \text{if } W(X_{r1,G}) < W(X_{r2,G}) \\ X_{r2,G} + mf(X_{r1,G} - X_{r3,G}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

همچنین cr ضریب تقاطع از رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آید که سبب ایجاد پاسخی بهتر برای الگوریتم می‌شود. [۱۸]

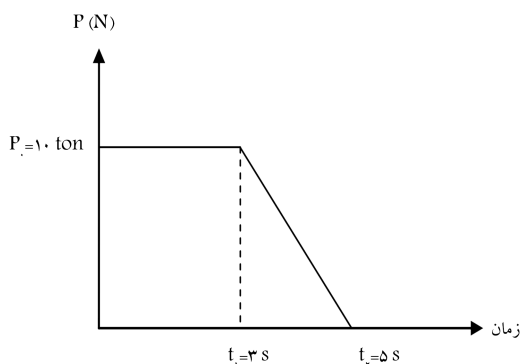
$$cr = \exp\left(-\frac{K}{K_{\max}}\right) \quad (18)$$

۵. مثال عددی

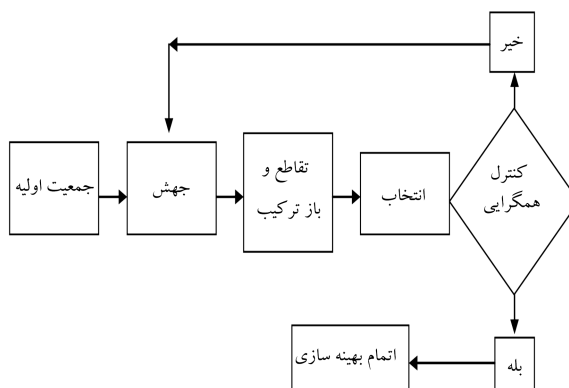
قابلیت روش پیشنهادی در شناسایی خرابی در اتصال‌ها با دو مثال عددی بررسی شده است. مثال‌های عددی، شامل: دو قاب دوطبقه‌ی ۱ و ۳ دهانه است که هر دو قاب در معرض بار ضربه‌یی مطابق شکل ۳ قرار گرفته‌اند.

۱.۵. مثال اول: قاب ۶ طبقه‌ی یک دهانه

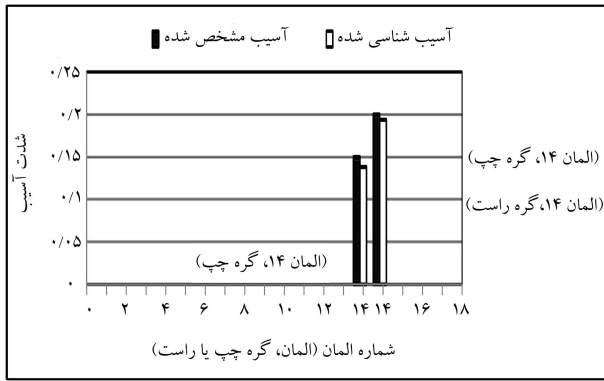
در بخش حاضر، یک قاب با ۱۸ المان مطابق شکل ۴ به عنوان مثال اول بررسی شده است. تعداد درجه‌های آزادی کل سازه‌ی مذکور با حذف درجه‌های آزادی مقید در تکیه‌گاه، ۳۶ است. بار ضربه‌یی در گره ۷ (درجه‌ی آزادی افقی) به قاب وارد می‌شود. مشخصات مقاطع و دو الگوی خرابی برای قاب ذکر شده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. پارامترهای بهینه‌سازی $NP = 50$ ، $mf = 0.5$ و cr از رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آیند. مقدار $K_{\max} = 10000$ است. در ابتدا، به بررسی محل قرارگیری حسگر و تعداد آن پرداخته شده است.



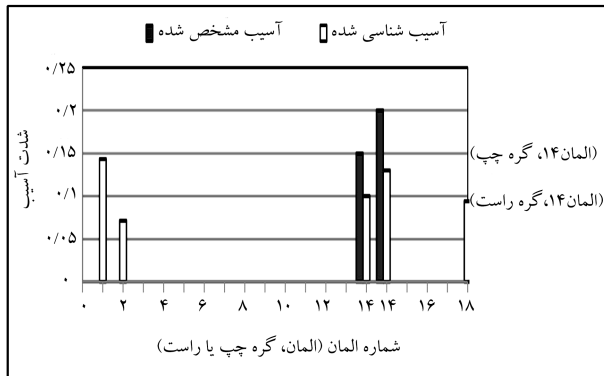
شکل ۳. بار ضربه‌یی دوزنقه‌یی.



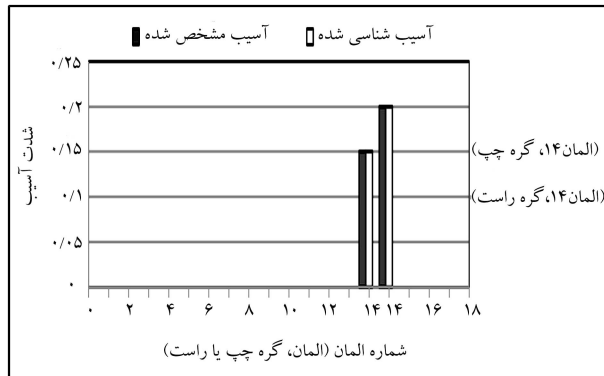
شکل ۲. فرایند عمومی الگوریتم تکامل تفاضلی.



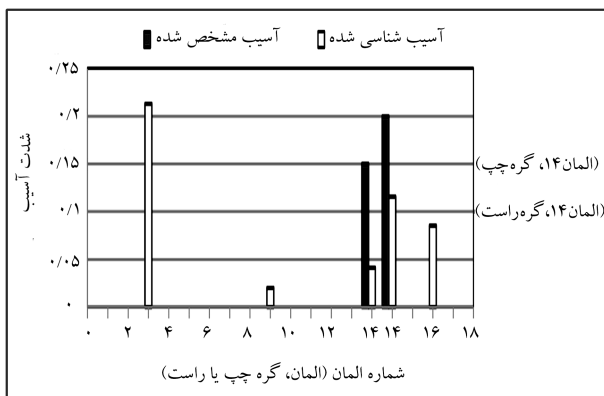
شکل ۵. نمودار شناسایی خرابی در حالت G1 و حالت ۱ قرارگیری حسگر.



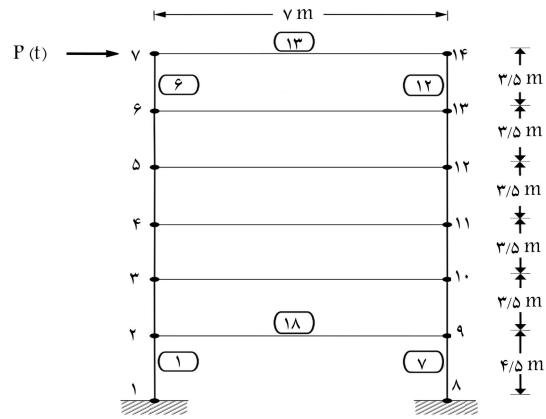
شکل ۶. نمودار شناسایی خرابی در حالت G1 و حالت ۲ قرارگیری حسگر.



شکل ۷. نمودار شناسایی خرابی در حالت G1 و حالت ۳ قرارگیری حسگر.



شکل ۸. نمودار شناسایی خرابی در حالت G1 و حالت ۴ قرارگیری حسگر.



شکل ۴. مدل قاب فولادی ۶ طبقه با ۱۸ المان.

جدول ۱. مشخصات مقاطع قاب فولادی ۶ طبقه.

$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$E (GPa)$	$I (m^4)$	$A (m^2)$	
۷۸۵۰	۲۱۰	$5,62 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-2}$	قاب ۱
۷۸۵۰	۲۱۰	$7,12 \times 10^{-2}$	$2,78 \times 10^{-2}$	تیر
				ستون

جدول ۲. حالت‌های آسیب دیدگی اعمال شده به قاب با ۱۸ المان.

(شماره‌ی گره، شماره‌ی المان)			
-	$(14, 2) = 0,20$	$(14, 1) = 0,15$	G1
$(14, 1) = 0,30$	$(6, 1) = 0,10$	$(5, 2) = 0,25$	G2

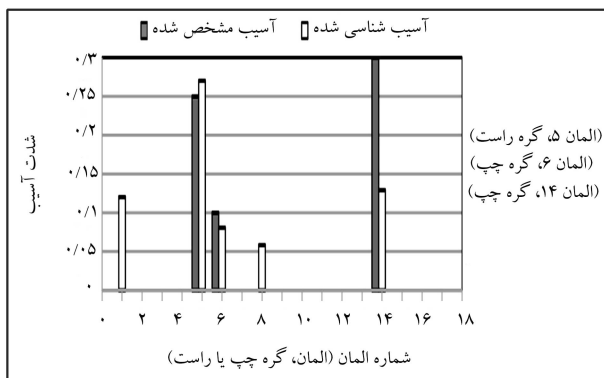
جدول ۳. حالت‌های قرارگیری حسگرها.

شماره‌ی گره		حالت	
-	-	۷	۱
-	۱۲	۱۰	۲
-	۱۴	۱۳	۳
۹	۴	۳	۴
۱۴	۱۲	۷	۵

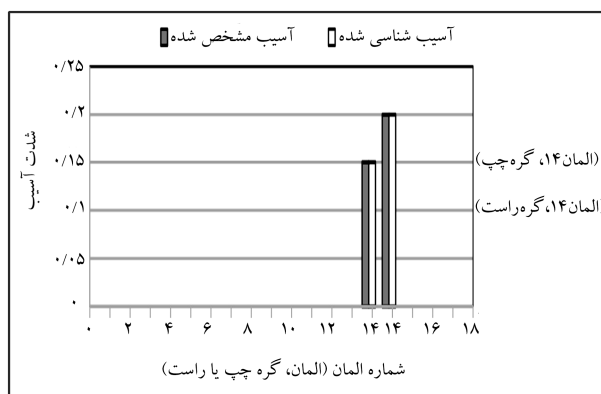
۱.۱.۵. بررسی تأثیر محل قرارگیری حسگرها و تعداد آن‌ها در شناسایی خرابی

از عوامل تأثیرگذار در روش پیشنهادی، می‌توان به محل قرارگیری حسگرها و تعداد آن‌ها اشاره کرد. به دست آوردن بهترین حالت، نیاز به آزمون و خطا دارد. در نوشتار حاضر، ۵ حالت قرارگیری حسگر مطابق جدول ۳ بررسی شده است. کلیه‌ی حسگرها در درجه‌ی آزادی افقی قرار گرفته‌اند. نمودار شناسایی خرابی در حالت G1 با ۵ حالت قرارگیری حسگر در شکل‌های ۵ الی ۹ مشاهده می‌شود:

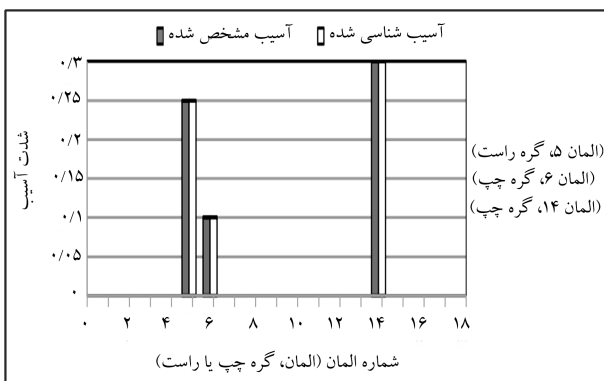
همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، نزدیکی حسگرها به موقعیت بار ضربه‌یی و موقعیت خرابی، موجب افزایش دقت در شناسایی محل و شدت خرابی شده است. همچنین اگر محل خرابی در طبقات بالای قاب قرار گیرد، روش پیشنهادی قادر به شناسایی بهتر محل و میزان خرابی خواهد بود، زیرا جابه‌جایی در بالای قاب (طبقات بالا) بیشتر از جابه‌جایی در قسمت تحتانی (طبقات پایین) قاب است. افزایش تعداد حسگر سبب افزایش دقت در روش مذکور می‌شود، اما اگر حسگرها در جای نامناسب قرار گیرند، در روند شناسایی خرابی اختلال به وجود



شکل ۱۱. نمودار شناسایی خرابی در حالت G2 و حالت 2 قرارگیری حسگر.



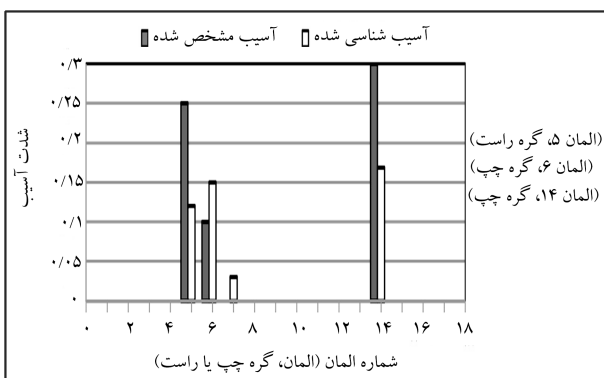
شکل ۹. نمودار شناسایی خرابی در حالت G1 و حالت 5 قرارگیری حسگر.



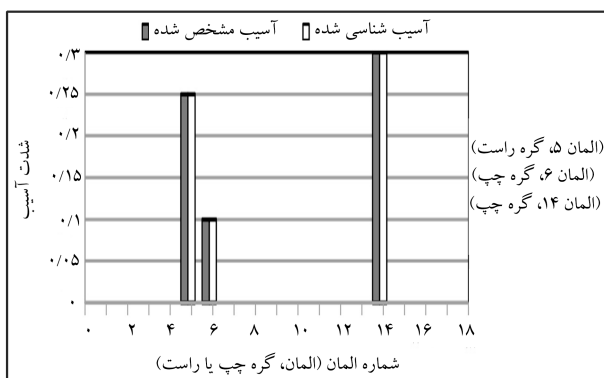
شکل ۱۲. نمودار شناسایی خرابی در حالت G2 و حالت 3 قرارگیری حسگر.



شکل ۱۰. نمودار شناسایی خرابی در حالت G2 و حالت 1 قرارگیری حسگر.



شکل ۱۳. نمودار شناسایی خرابی در حالت G2 و حالت 4 قرارگیری حسگر.



شکل ۱۴. نمودار شناسایی خرابی در حالت G2 و حالت 5 قرارگیری حسگر.

می‌آید. همین روند برای حالت خرابی G2 تکرار می‌شود. در شکل‌های ۱۰ الی ۱۴، نمودارهای شناسایی خرابی برای ۵ حالت قرارگیری حسگر در دو حالت خرابی G1 و G2، همان‌طور که مشاهده می‌شود، قرارگیری حسگرها در طبقات بالا، سبب شناسایی بهتر محل و شدت خرابی می‌شود و همچنین افزایش تعداد حسگرها دقت روش شناسایی را بالا خواهد برد، با این شرط که در محل مناسب نصب شود. از جنبه‌ی تئوری، حسگر باید در جایی قرارگیرد که خرابی، اثر بیشتری در آن‌ها داشته باشد، تا شناسایی بهتر صورت گیرد؛ اما در حالت عملی، موقعیت خرابی مشخص نیست و شاید از ایده‌ی عنوان شده نتوان استفاده کرد.

۲.۱.۵. شناسایی خرابی در قاب 6 طبقه با 18 المان

با آزمون و خطا، بهترین حالت‌های قرارگیری حسگر در دو حالت خرابی G1 و G2، حالت‌های 3 و 5 است که در مطالعه‌ی حاضر حالت 3 (با دو حسگر) به دلیل تعداد حسگر کمتر برای ادامه‌ی کار انتخاب شده است. نمودار شناسایی خرابی در اتصال و نمودار هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی بدون در نظر گرفتن نویز در حالت خرابی G1 به ترتیب در شکل‌های 15 و 16 و در حالت خرابی G2 به ترتیب در شکل‌های 17 و 18 نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی، موقعیت و شدت خرابی را بدون در نظر گرفتن نویز با دقت بسیار بالایی پیدا می‌کند و نتایج به دست آمده مؤید کارایی بالای روش مذکور است و همچنین مشاهده می‌شود که با تقریباً 160 بار تکرار الگوریتم، در 40 تکرار آخر تغییر محسوسی ایجاد نشده و الگوریتم به هم‌گرایی رسیده است. حال نتایج حاصل با اعمال نویز اندازه‌گیری با درصد خطای استاندارد 1٪، 3٪ و 5٪ برای دو حالت خرابی مذکور بررسی شده است. برای

شبیه‌سازی اثر نویز از رابطه‌ی ۱۹ استفاده شده است:

$$a_d^{noisy} = a_d[1 + (2(random) - 1)noise] \quad (19)$$

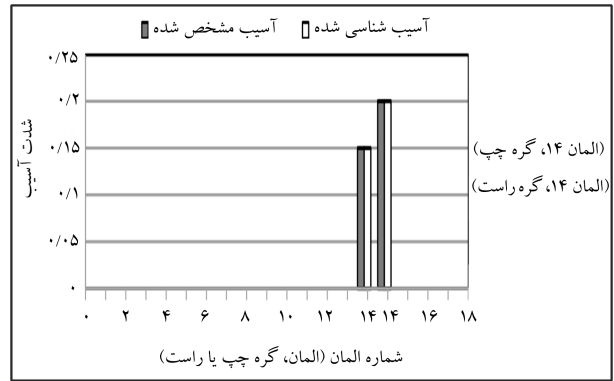
که $noise$ مقدار نویز اندازه‌گیری و $random$ تابع تولید مقادیر اتفاقی مثبت کوچک‌تر از ۱ است که هم اندازه با بردار شتاب گره‌ی سازی آسیب دیده توسط نرم‌افزار متلب تولید می‌شود. همچنین a_d بردار شتاب‌های گره‌ی سازی آسیب‌دیده است. شکل‌های ۱۹ و ۲۰، نمودارهای شناسایی خرابی در دو حالت خرابی $G1$ و $G2$ با در نظر گرفتن نویز ۱٪، ۳٪، ۵٪ را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود نویز سبب به وجود آمدن اختلال در یافتن شدت آسیب شده است، اما محل خرابی را با دقت خوبی پیدا کرده است.

۲.۵. مثال دوم: قاب ۷ طبقه‌ی ۳ دهانه

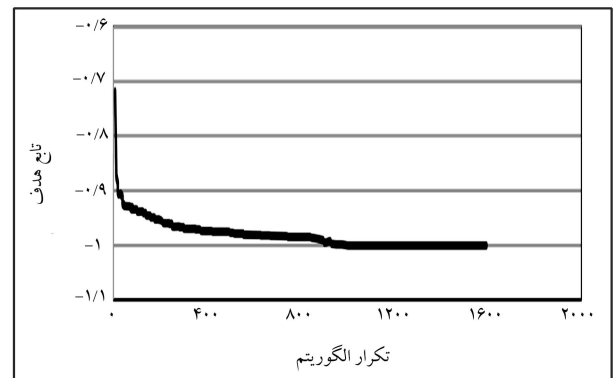
در پژوهش حاضر، قاب با ۴۹ المان مطابق شکل ۲۱ به‌عنوان مثال دوم بررسی شده است. تعداد درجه‌های آزادی کل سازه‌ی مذکور با حذف درجه‌های آزادی مقید در تکیه‌گاه، ۸۴ است. بار ضربه‌ی در گره ۸ (درجه‌ی آزادی افقی) به قاب وارد می‌شود. مشخصات مقاطع و دو سناریوی خرابی برای قاب مذکور به‌ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. پارامترهای بهینه‌سازی $NP = 60$ ، $mf = 0.6$ و cr از رابطه‌ی ۱۸ به‌دست می‌آید. مقدار $k_{max} = 10000$ است.

۱.۲.۵. بررسی تأثیر محل قرارگیری حس‌گرها و تعداد آن‌ها در شناسایی خرابی

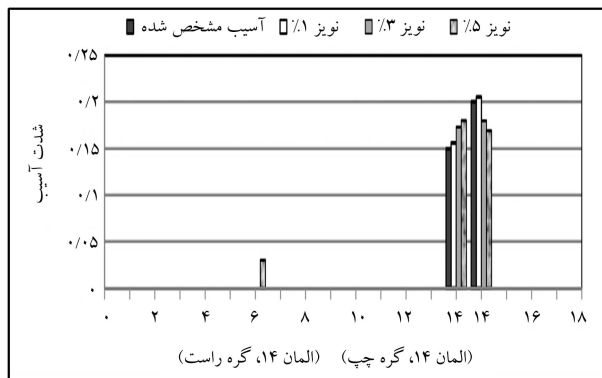
در مثال کنونی نیز ۵ حالت قرارگیری حسگر طبق جدول ۶ در نظر گرفته شده است، تا با آزمون و خطا بهترین حالت قرارگیری حسگر مشخص شود. به ذکر لازم است



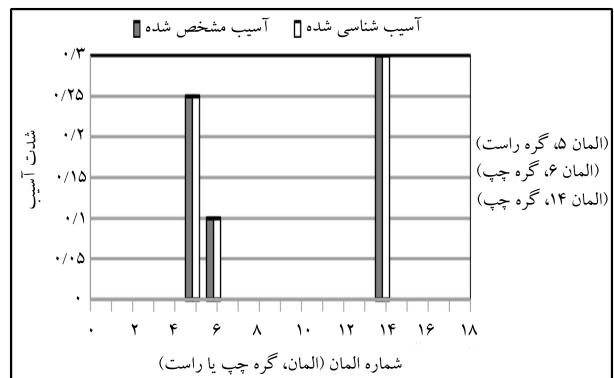
شکل ۱۵. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی $G1$.



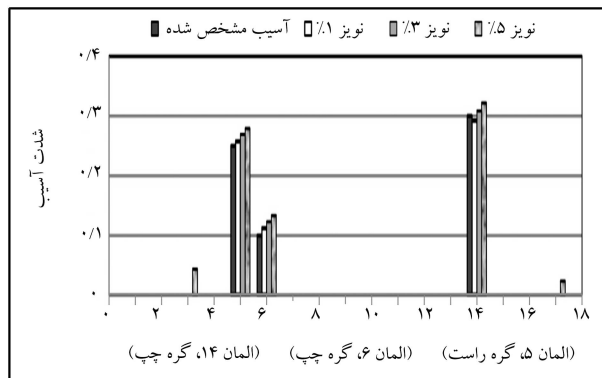
شکل ۱۶. نمودار هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی در حالت خرابی $G1$.



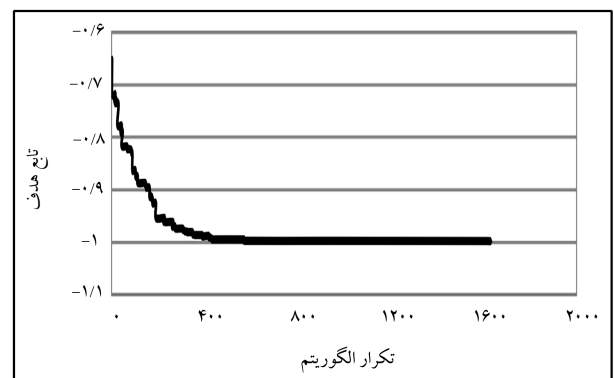
شکل ۱۹. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی $G1$ با در نظر گرفتن نویز.



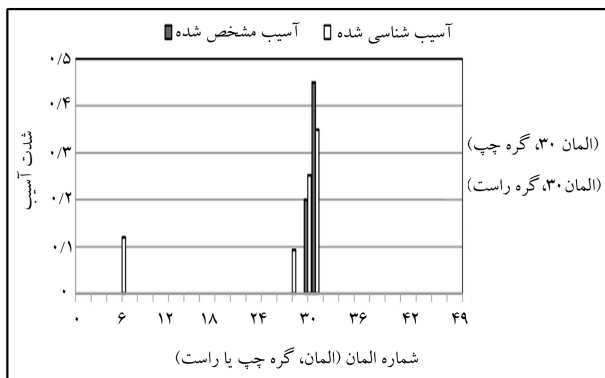
شکل ۱۷. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی $G2$.



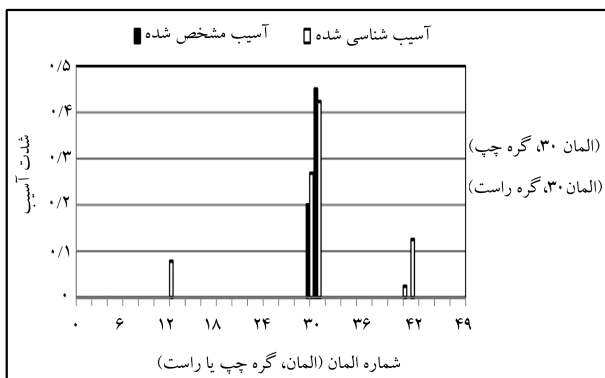
شکل ۲۰. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی $G2$ با در نظر گرفتن نویز.



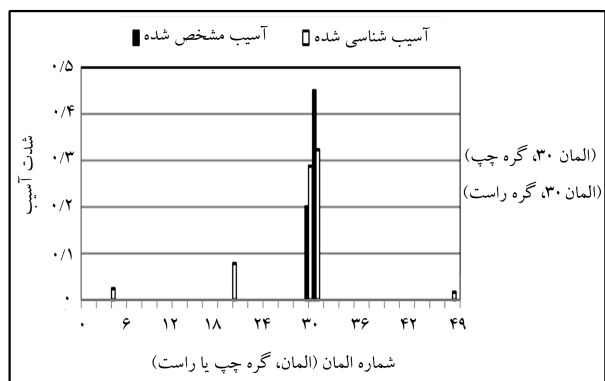
شکل ۱۸. نمودار هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی در حالت خرابی $G2$.



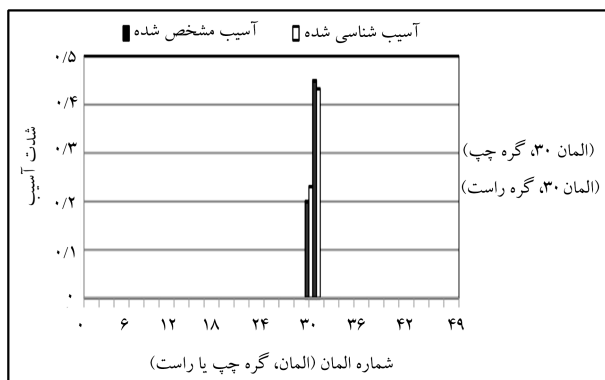
شکل ۲۲. نمودار شناسایی خرابی در حالت G۱ و حالت ۱ قرارگیری حسگر.



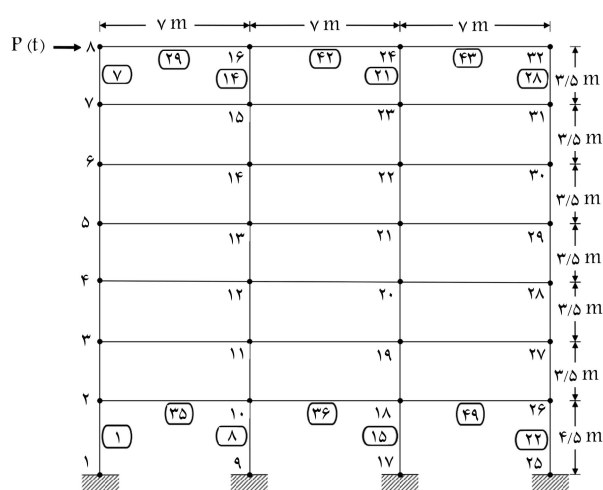
شکل ۲۳. نمودار شناسایی خرابی در حالت G۱ و حالت ۲ قرارگیری حسگر.



شکل ۲۴. نمودار شناسایی خرابی در حالت G۱ و حالت ۳ قرارگیری حسگر.



شکل ۲۵. نمودار شناسایی خرابی در حالت G۱ و حالت ۴ قرارگیری حسگر.



شکل ۲۱. مدل قاب فولادی ۷ طبقه با ۴۹ المان.

جدول ۴. مشخصات مقاطع قاب فولادی ۷ طبقه.

$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$E (GPa)$	$I (m^4)$	$A (m^2)$	
۷۸۵۰	۲۱۰	$5,62 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-2}$	قاب ۲
۷۸۵۰	۲۱۰	$7,12 \times 10^{-4}$	$2,78 \times 10^{-2}$	تیر
				ستون

جدول ۵. حالت‌های آسیب دیدگی اعمال شده به قاب با ۴۹ المان.

شماره‌ی گره، شماره‌ی المان	
G۱	$(30, 1) = 0,2$ $(30, 2) = 0,45$
G۲	$(31, 1) = 0,35$ $(6, 1) = 0,25$ $(5, 2) = 0,1$

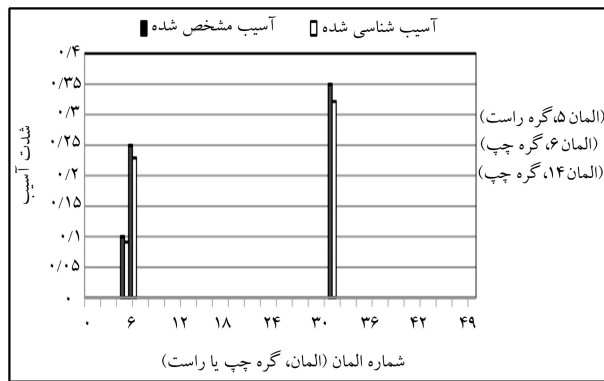
جدول ۶. حالت‌های قرارگیری حسگرها.

حالت	شماره‌ی گره
۱	۳۱
۲	۳۲
۳	۲۱
۴	۳۱
۵	۲۳

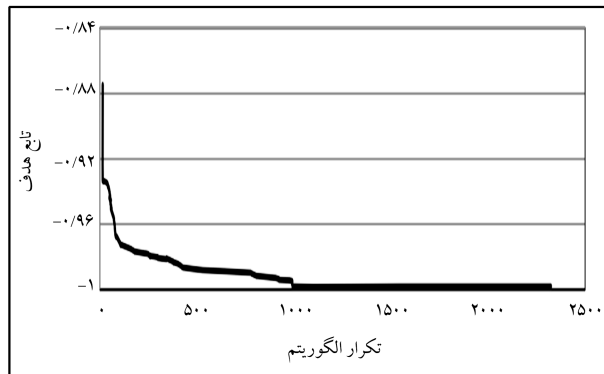
که کلیه‌ی حسگرها در درجه‌ی آزادی افقی قرار گرفته‌اند. در بخش حاضر، نتایج فقط برای حالت خرابی G۱ ارائه شده است. نمودار شناسایی خرابی در حالت G۱ با ۵ حالت قرارگیری حسگر در شکل‌های ۲۲ الی ۲۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۲۲ الی ۲۶ مشاهده می‌شود، قرارگیری حسگرها در طبقات بالا و نزدیکی آن‌ها به موقعیت خرابی، سبب شناسایی بهتر محل و شدت خرابی می‌شود و افزایش تعداد حسگرها به همراه تعبیه‌ی آن‌ها در محل مناسب، دقت روش شناسایی را بالا خواهد برد و قرارگیری حسگر در محل نامناسب سبب پدید آمدن خطا حتی با وجود تعداد حسگرهای بیشتر می‌شود.

۲.۲.۵. شناسایی خرابی در قاب ۷ طبقه با ۴۹ المان

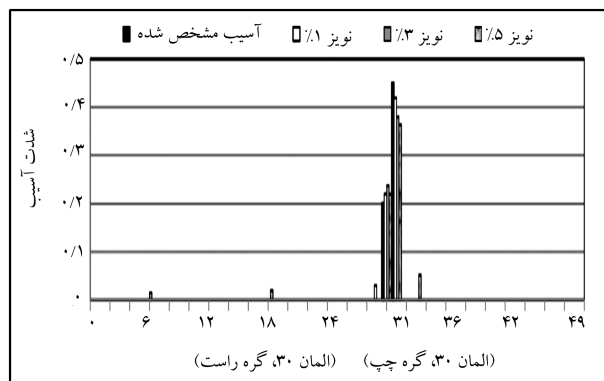
با آزمون و خطا، بهترین حالت‌های قرارگیری حسگر، حالت‌های ۴ و ۵ است که در



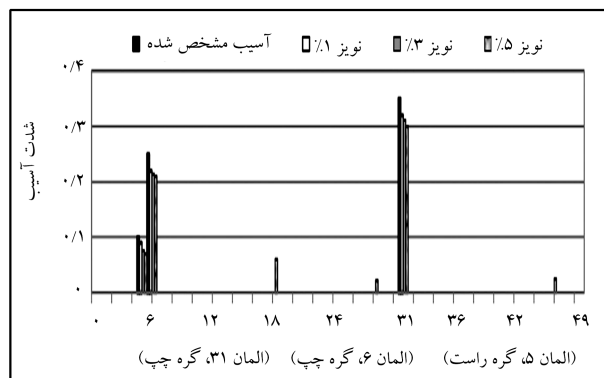
شکل ۲۹. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی G۲.



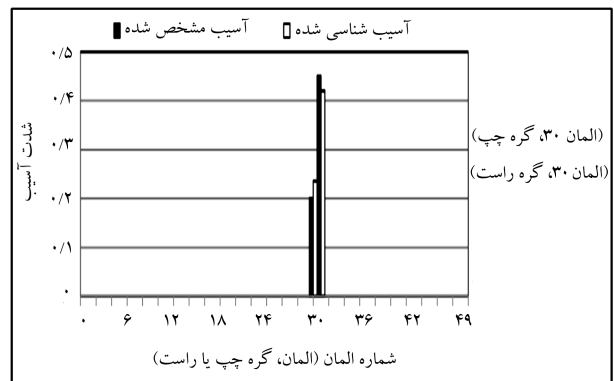
شکل ۳۰. نمودار هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی در حالت خرابی G۲.



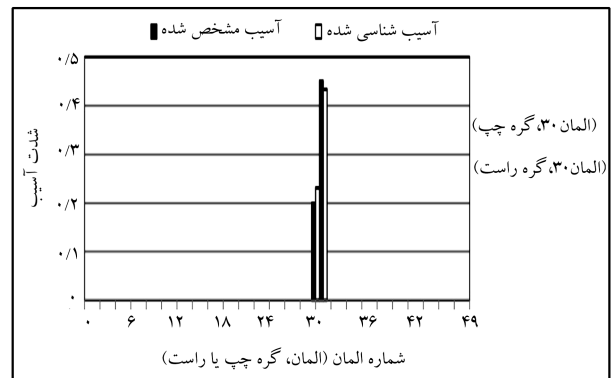
شکل ۳۱. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی G۱ با در نظر گرفتن نویز.



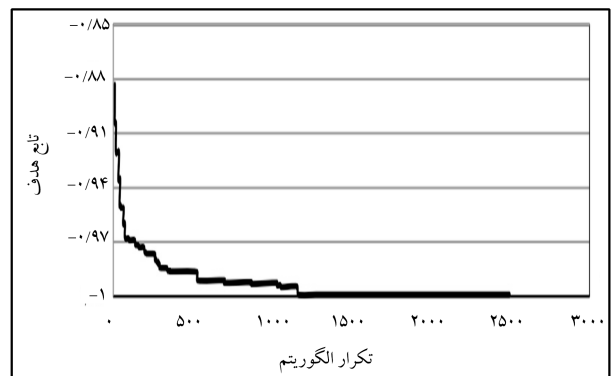
شکل ۳۲. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی G۲ با در نظر گرفتن نویز.



شکل ۲۶. نمودار شناسایی خرابی در حالت G۱ و حالت ۵ قرارگیری حسگر.



شکل ۲۷. نمودار شناسایی خرابی در حالت خرابی G۱.



شکل ۲۸. نمودار هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی در حالت خرابی G۱.

مطالعه‌ی حاضر حالت ۴ (با دو حسگر) برای ادامه‌ی کار انتخاب شده است. نمودار شناسایی خرابی در اتصال و نمودار هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی بدون در نظر گرفتن نویز در حالت خرابی G۱ به ترتیب در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ و در حالت خرابی G۲ به ترتیب در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ مشاهده می‌شوند.

در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی موقعیت و شدت خرابی را بدون در نظر گرفتن نویز با دقت بالایی پیدا کرده است. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی تقریباً ۲۵۰۰ بار تکرار شده است که در ۴۰۰ تکرار آخر، تغییر محسوسی در آن مشاهده نمی‌شود و الگوریتم به هم‌گرایی رسیده است. حال با اعمال نویز اندازه‌گیری با درصد خطای استاندارد ۱٪، ۳٪، ۵٪ نتایج حاصل برای دو حالت خرابی مذکور بررسی می‌شود. شکل‌های ۳۱ و ۳۲، به ترتیب نمودارهای شناسایی خرابی در حالت خرابی G۱ و G۲ با در نظر گرفتن نویز را نشان می‌دهند. مشاهده

می‌شود که با وجود نویز محل خرابی به خوبی پیدا شده است، اما در تعیین شدت خرابی اختلال به وجود آمده است.

۶. نتیجه‌گیری

وجود خرابی در سازه‌ها باعث تغییراتی در پاسخ‌های دینامیکی از جمله شتاب سازه می‌شود که می‌توان با استفاده از آن‌ها، محل و شدت خرابی را تشخیص داد. در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است که روشی کارآمد از شاخه‌ی عیب‌یابی غیرمخرب سازه‌ها ارائه شود تا از هزینه‌های مربوط به این کار کاسته و مکان دقیق خرابی برآورد شود. در این راستا تلاش شده است تا از روابط ساده‌تری در مقایسه با دیگر روش‌ها استفاده شود. به منظور شناسایی و تخمین میزان و محل آسیب در اتصالات تیر به ستون در قاب خمشی براساس روند ارائه شده در

بخش‌های پیشین، ابتدا تمام اتصالات‌های قاب فولادی با فنرهای پیچشی فاقد طول در انتهای تیر مدل شدند. شدت آسیب در اتصال نیز به صورت کاهش نسبت ضریب صلبیت انتهایی اتصال تعریف شده است. در ادامه، مسئله‌ی تعیین محل و شدت خرابی در اتصال به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی استاندارد تبدیل و با به‌کارگیری الگوریتم تکامل تفاضلی بهبودیافته، مسئله‌ی بهینه‌سازی حل شد. دو مثال از قاب دوبعدی ارائه شده است که در هر کدام تأثیر محل و تعداد حسگر در شناسایی خرابی بررسی شد. نتایج به دست آمده، نشانگر کارایی و دقت بالای روش پیشنهادی در شناسایی موقعیت و شدت خرابی در حالت بدون نویز است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نویز اندازه‌گیری باعث بروز خطا در یافتن شدت آسیب‌های سازه به خصوص در نویز ۰.۳٪ و ۰.۵٪ می‌شود، اما مانع یافتن محل دقیق آن‌ها نمی‌شود و کم‌کم حل ارائه شده، هم‌گرایی خوبی نیز دارد. همچنین افزایش تعداد حسگر و جانمایی آن در محلی مناسب، سبب افزایش دقت شناسایی خرابی می‌شود.

پانوشته‌ها

1. improved differential evolution algorithm
2. approximate parameter change (APC)
3. damage signature matching (DSM)
4. piezoelectric sensors
5. bayesian calibration technique
6. particle swarm optimization (PSO)
7. Matlab
8. joint
9. first
10. end
11. differential evolution

منابع (References)

1. Seyedpoor, S.M. and Yazdanpanah, O. "An efficient indicator for structural damage localization using the change of strain energy based on static noisy data", *Applied Mathematical Modelling*, **38**(9-10), pp. 2661-2672 (2014).
2. Lam, H.F., Ko, J.M. and Wong, C.W. "Localization of damaged structural connections based on experimental modal and sensitivity analysis", *Journal of Sound and Vibration*, **210**(1), pp. 91-115 (1998).
3. Yun, C.B., Yi, J.H. and Bahng, E.Y. "Joint damage assessment of framed structures using a neural networks technique", *Engineering Structures*, **23**(5), pp. 425-435 (2001).
4. Ritdumrongkul, S. and Fujino, Y. "Identification of the location and level of damage in multiple-bolted-joint structures by PZT actuator-sensors", *Journal of Structural Engineering*, **132**(2), pp. 304-311 (2006).
5. Turker, T., Kartal, M.E., Bayraktar, A. and et al. "Assessment of semi-rigid connections in steel structures by modal testing", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(7), pp. 1538-1547 (2009).
6. Labuz, E.L., Chang, M. and Pakzad, S.H.N. "Local damage detection in beam-column connections using a dense sensor network", *Proceedings of Structures Congress 2010*, USA, pp. 3143-3154 (2010).
7. He, K. and Zhu, W.D. "Detection of damage in lightning masts and loosening of bolted connections in structures using changes in natural frequencies", *Part of the Series Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, USA, pp. 63-78 (2010).
8. Hegenderfer, J., Atamturktur, S. and Gillen, A. "Damage detection in steel structures using bayesian calibration techniques", *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, New York, pp. 179-193 (2012).
9. Nanda, B., Maity, D. and Maiti, D.K. "Modal parameter based inverse approach for structural joint damage assessment using unified particle swarm optimization", *Applied Mathematics and Computation*, **242**(In Progress), pp. 407-422 (2014).
10. Yin, T., Jiang, Q.H. and Yuen, K.V. "Vibration-based damage detection for structural connections using incomplete modal data by Bayesian approach and model reduction technique", *Engineering Structures*, **132**(In Progress), pp. 260-277 (2016).
11. Kathkhuda, H.N., Dwairi, H.M. and Shatarat, N. "System identification of steel framed structures with Semi-rigid connections", *Structural Engineering and Mechanics*, **34**(3), pp. 351-366 (2010).
12. Filho, M.S., Guimaraes, M.J.R., Sahlit, C.L. and et al. "Wind pressures in framed structures with semi-rigid connections", *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **26**(2), pp. 180-189 (2004).
13. Clough, R.W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York (1993).
14. Nobahari, M. and Seyedpoor, S.M. "Structural damage detection using an efficient correlation-based index and

- a modified genetic algorithm”, *Mathematical and Computer Modelling*, **53**(9-10), pp. 1798-1809 (2011).
15. Stutz, L.T., Tenenbaum, R.A. and Correa, R.A.P. “The Differential Evolution method applied to continuum damage identification via flexibility matrix”, *Journal of Sound and Vibration*, **345**(In Progress), pp. 86-102 (2015).
 16. Seyedpoor, S.M., Shahbandeh, S. and Yazdanpanah, O. “An efficient method for structural damage detection using a differential evolution algorithm-based optimization approach”, *Civil Engineering and Environmental Systems*, **32**(3), pp. 230-250 (2015).
 17. Das, S., Mullick, S.S. and Suganthan, P.N. “Recent advances in differential evolution-an updated survey”, *Swarm and Evolutionary Computation*, **27**, pp. 1-56 (2016).
 18. Erbao, C. and Mingyong, L. “A hybrid differential evolution algorithm to vehicle routing problem with fuzzy demands”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **231**(1), pp. 302-310 (2009).