



کنترل سلامت و عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

بهروز احمدی ندوشن^۱، الهه عبدی نسب^۲

^۱ -عضو هیأت علمی، دانشگاه یزد، Behrooz.ahmadi@Gmail.com

^۲ -دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه یزد

چکیده

در زمینه‌ی کنترل سلامت سازه‌ها، هدف اصلی اطمینان از سلامت سازه و یا تشخیص آسیب‌های موجود در سازه جهت تصمیم‌گیری برای استفاده، ترمیم و یا عدم استفاده از سیستم‌های آسیب‌دیده می‌باشد. با توجه به اینکه آسیب باعث تغییر مشخصات فیزیکی المان‌های سازه می‌گردد و در پی آن پاسخ‌های دینامیکی و استاتیکی سازه تغییر می‌کند، از این رو می‌توان با ارزیابی پاسخ‌های سازه قبل و بعد از آسیب به عدم سلامت سازه و همچنین موقعیت و شدت آسیب پی برد. در این تحقیق پارامترهای فیزیکی سازه به عنوان مجهولات مسئله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای فیزیکی مجهول مسئله تا بازسازی پاسخ‌های مودال سازه‌ی آسیب‌دیده در هر مرحله از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، به روز رسانی شده و سپس با مجهول‌یابی مسئله توسط الگوریتم فاخته، موقعیت و شدت دقیق آسیب شناسایی گردیده است. فرایند به روز رسانی پارامترهای مجهول با استفاده از همگرا نمودن چندین تابع هدف مختلف انجام شده است. در نهایت عملکرد توابع مختلف در بازسازی پاسخ‌های سازه‌ی آسیب‌دیده بر اساس پارامترهای مجهول به‌روز شده مقایسه گردیده است.

کلمات کلیدی: کنترل سلامت سازه‌ها، تشخیص شدت آسیب، پاسخ‌های مودال، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

۱- مقدمه

بسیاری از سازه‌های موجود، که چند دهه‌ی پیش ساخته شده‌اند، هنوز در حال استفاده، ولی رو به خراب شدن هستند. به عنوان مثال می‌توان به حدود بیست الی سی درصد زیرساخت‌های امریکا، مانند پل‌ها، راه آهن و مدارس اشاره کرد، که از لحاظ سازه‌ای دچار آسیب شده و نیاز به تعمیر دارند. بنابراین، تشخیص بموقع آسیب، پایش و تحلیل سازه‌ی آسیب‌دیده به منظور ایمنی آن، امری حیاتی است. تکنیک‌ها و روش‌های بسیاری برای ارزیابی غیرمخرب (NDE) سیستم‌های سازه‌ای وجود دارند. این روش‌ها با توجه به داده‌های مورد استفاده، به روش‌های تشخیص دینامیکی و استاتیکی طبقه بندی می‌شوند. هدف از این روش‌ها، تنظیم پارامترهای مدل تحلیلی یا عددی، به گونه‌ای است که با داده‌های تحلیلی و اندازه‌گیری شده مطابقت داشته باشند [۱].

تشخیص آسیب در سازه‌ها و ارزیابی عمر باقی مانده‌ی آن‌ها برای اطمینان از یکپارچگی سازه بسیار مهم است. آسیب در سازه ممکن است تحت بار سرویس، بدلیل مقاومت خستگی کم و یا نقص‌های فنی ایجاد شود. گاهی اوقات شدت و موقعیت آسیب را می‌توان از طریق بازرسی چشمی تعیین کرد. اما روش بازرسی چشمی برای ارزیابی شدت آسیب، ظرفیت محدودی دارد. به ویژه هنگامی که آسیب درون سازه نهفته است و از

خارج قابل مشاهده نیست. بنابراین استفاده از یک روش ارزیابی آسیب موثر و قابل اعتماد، برای تشخیص به موقع آسیب بسیار مفید خواهد بود [۲].

در گذشته، از داده‌های تست ارتعاش برای تشخیص موقعیت آسیب در سازه و بررسی یکپارچگی سیستم‌های صنعتی در رشته‌ی مهندسی عمران و هوانوردی استفاده می‌شد. در اوایل در روش‌های تحلیلی و تجربی، فقط از تغییرات سختی منطبق بر تغییر فرکانس استفاده گردید و تغییر در اشکال مودی کاملاً نادیده گرفته شد. بعدها پانندی و همکاران از تغییر در ماتریس نرمی سازه برای تشخیص موقعیت آسیب استفاده کردند. روش دیگری که توسط محققین ارائه شد، استفاده از تغییرات فرکانس به کمک تحلیل حساسیت پارامترهای مودال سازه بود که از مدل‌های تحلیلی و آزمایشات تجربی بدست آمد. کالی و آدامز از مدل المان محدود و جیو از مدل مودال برای تشخیص آسیب استفاده نمودند [۳].

روش‌های پاسخ لرزه‌ای، در چند دهه‌ی گذشته، به طور گسترده برای تشخیص آسیب و پایش سلامت سازه‌ها استفاده می‌شوند. در این روش‌ها فرض بر این است که آسیب باعث تغییر در خصوصیت فیزیکی سازه و به طور عمده در سختی و میرایی در بخش‌های آسیب‌دیده می‌شود. این تغییرات سازه‌ای در اثر تغییر در فرکانس طبیعی، اشکال مودی، نسبت میرایی، انرژی کرنشی مودال و یا دیگر ویژگی‌های دینامیکی سیستم ایجاد می‌شوند. بنابراین با پایش یک یا چند خصوصیت سازه‌ی آسیب‌دیده موقعیت و شدت آسیب تشخیص می‌گردد. در این زمینه، شاخص‌های آسیب متعددی، از جمله فرکانس طبیعی، شکل مودی، انعطاف‌پذیری مودال و همبستگی داده‌های مودال بررسی شده است [۴].

۲- مبانی عیب‌یابی

در اکثر مقالات خرابی فرض شده است که خرابی موجب کاهش مدول الاستیسیته‌ی المان‌ها گردیده و در پی آن موجب تغییر ماتریس سختی سازه می‌شود و تاثیری بر ماتریس جرم سازه ندارد. بنابراین ماتریس جرم را قبل و بعد از آسیب یکسان فرض نموده اند. لذا در اثر تغییرات ماتریس سختی سازه پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سازه تغییر می‌کند.

$$K_d = K + \sum_{e=1}^n \Delta K_n = K + \sum_{e=1}^n \alpha \Delta K_n \quad (1)$$

$$\omega_{id} = \omega_i + \Delta \omega_i \quad (2)$$

$$\phi_{id} = \phi_i + \Delta \phi_i \quad (3)$$

$$M_d = M \quad (4)$$

در روابط فوق، اندیس d بیانگر سازه‌ی آسیب‌دیده، n تعداد اعضای آسیب‌دیده K ، M ، ω_i و ϕ_i به ترتیب ماتریس‌های سختی و جرم، فرکانسها و اشکال مودی در مود i ام سازه‌ی سالم می‌باشند. α ضریبی است که باعث تغییر ماتریس سختی سازه‌ی آسیب‌دیده می‌شود.

۳- الگوریتم فاخته

پس از ارائه الگوریتم CS توسط یانگ و دب در سال ۲۰۰۹ در سال ۲۰۱۱ محقق ایرانی به نام رجیبون نسخه متفاوتی از الگوریتم فاخته با نام COA ارائه نمود. در این ویرایش از الگوریتم فاخته از اصول پرواز لوی به هیچ عنوان استفاده نشده و تلاش گردیده است تا با انطباق بیشتر مراحل الگوریتم بر شیوه زندگی پرنده فاخته سرعت همگرایی و جواب نهایی نسبت به الگوریتم CS بهبود یابد.

۳-۱- تولید محل‌های سکونت اولیه فاخته‌ها (جمعیت اولیه جواب‌های کاندید):

برای حل یک مسئله بهینه‌سازی لازم است تا مقادیر متغیرهای مسئله به فرم یک آرایه به نام "محل سکونت" شکل گیرند. در یک مسئله بهینه‌سازی که دارای N متغیر طراحی می‌باشد یک "محل سکونت" آرایه‌ای $1 \times N_{var}$ خواهد بود که موقعیت فعلی زندگی فاخته‌ها را نشان می‌دهد. این آرایه به شکل زیر تعریف می‌شود [۵]:

$$\text{Habitat} = [X_1, X_2, \dots, X_{N_{var}}] \quad (5)$$

۳-۲- نحوه تخم‌گذاری فاخته‌ها

گروه‌های فاخته به صورت تصادفی در مناطق مختلف و در شعاع‌هایی که به عنوان شعاع تخم‌گذاری برای فاخته‌ها مطابق رابطه (۶) تعریف شده است در لانه‌ی پرندگان میزبان اقدام به تخم‌گذاری می‌کنند. در این رابطه شعاع تخم‌گذاری برای هر فاخته، متناسب با تعداد کل تخم‌ها، تعداد تخم‌های فعلی هر فاخته و همچنین حد بالا و پایین متغیرهای مسئله می‌باشد. α نیز متغیری است که با آن حداکثر شعاع تخم‌گذاری تنظیم می‌گردد.

$$\text{ELR} = \alpha \times \frac{(\text{Number of current cuckoos eggs})}{\text{Total number of eggs}} \times (\text{var}_{hi} - \text{var}_{low}) \quad (6)$$

۳-۳- کشف تخم‌های فاخته

هر فاخته به صورت تصادفی تخم‌هایی را در لانه‌ی پرندگان میزبان که در ELR خود قرار دارد، می‌گذارد. بعد از هر تخم‌گذاری $P\%$ از تمام تخم‌ها (معمولاً 10%) که مقدار تابع سود آن‌ها کمتر است نابود می‌شوند [۵].

۳-۴- مهاجرت فاخته‌ها:

وقتی جوجه فاخته‌ها بالغ شدند برای تخم‌گذاری به habitat های بهتر که در آنجا شانس زنده ماندن تخم‌ها بیشتر است مهاجرت می‌کنند. پس از تشکیل گروه‌های فاخته در مناطق مختلف زیستگاهی (فضای جستجوی مسئله)، گروه دارای بهترین موقعیت به عنوان نقطه هدف برای سایر فاخته‌ها جهت مهاجرت انتخاب می‌شود. هنگام مهاجرت به سمت نقطه‌ی هدف، هر فاخته فقط $\lambda\%$ از کل مسیر را به سمت هدف ایده‌آل فعلی طی می‌کند و یک انحراف ϕ رادیان نیز دارد. این دو پارامتر به فاخته‌ها کمک می‌کند تا محیط بیشتری را جستجو کنند. λ عددی تصادفی بین ۰ و ۱ است و ϕ عددی بین $-\pi/6$ و $\pi/6$ می‌باشد.

۳-۵- ویژگی‌های الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

یکی از تفاوت‌های الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با سایر روش‌های بهینه‌سازی در این است که امکان وجود بیش از یک دسته جواب در یک habitat وجود دارد. این امر سبب می‌گردد تا در هر مرحله یک ماتریس habitat به سبب $N_{pop} \times N_{var}$ تولید گردد. بنابراین برای هر "محل

سکونت" بیش از یک جواب وجود دارد. به همین دلیل برای محاسبه‌ی تابع سود میانگین جواب‌های ایجاد شده برای هر یک از جمعیت‌های موجود در یک محل سکونت محاسبه می‌گردد.

۴- روش پیشنهادی

همانطور که در قسمت قبل بیان گردید آسیب در عضوهای سازه موجب تغییر در پاسخ‌های سازه می‌شود. حل مسائل عیب‌یابی سازه‌ها در واقع همان مجهول‌یابی مشخصات فیزیکی سازه پس از آسیب می‌باشد. در این تحقیق سعی بر آن است که مجهولات مسئله با استفاده از الگوریتم کارای بهینه‌سازی پیوسته‌ی فاخته بدست آورده شوند. در این راستا بردار پارامتر به روزرسانی X به عنوان مجهول مسئله در نظر گرفته می‌شود. پارامتر بی‌بعد به‌روز رسانی (X^e)، مقدار نسبی پارامتر خرابی E^e (مدول الاستیسیته به روز شده) نسبت به مقدار اولیه‌ی E_0^e (مدول الاستیسیته اولیه) می‌باشد. که با ماتریس سختی اعضاء رابطه‌ی خطی دارد.

$$X^e = \frac{E^e - E_0^e}{E_0^e} \Rightarrow E^e = E_0^e(1 - X) \quad (7)$$

در واقع درصد کاهش مدول الاستیسیته‌ی عضو، بعنوان درصد خرابی عضو در نظر گرفته می‌شود. در فرایندی تکراری مجهول‌یابی مسئله تا برابر شدن پاسخ خراب واقعی و خراب فرضی ادامه خواهد یافت. در این راستا حل مسئله نیازمند تعریف تابع هدفی مناسب مبتنی بر اختلاف پاسخ‌های خراب واقعی و خراب فرضی می‌باشد. منظور از پاسخ خراب فرضی پاسخی است که در هر مرحله از الگوریتم به ازای پارامتر به‌روز رسانی بدست می‌آید. لذا در این تحقیق جهت معرفی بهترین روش، عملکرد چند تابع هدف با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

تابع هدف اول مبتنی بر اختلاف پاسخ فرکانس خراب واقعی و خراب فرضی می‌باشد.

$$F1 = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} \frac{\|f_{j,up}(x) - f_{j,d}\|^2}{\|f_{j,d}\|^2} \quad (8)$$

در رابطه‌ی فوق $f_{j,d}$ فرکانس طبیعی سازه‌ی آسیب‌دیده در مود j ام و $f_{j,up}(d)$ فرکانس به روز شده‌ی سازه در مود j ام و N_m تعداد مودهای موجود می‌باشد.

تابع هدف دوم مبتنی بر معیار MDLAC بوده که بر گرفته از اختلاف پاسخ فرکانس خراب واقعی و خراب فرضی می‌باشد. در این روش، دو بردار پارامتری باید تعیین شوند که یک بردار پارامتری مورد استفاده ΔF است و برابر با نسبت تغییرات فرکانس طبیعی به دلیل خسارات سازه‌ای می‌باشد [۶].

$$\Delta F = \frac{F_h - F_d}{F_h} \quad (9)$$

به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بردار فرکانس طبیعی سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده است. به همین ترتیب، بردار پارامتری دوم بدین شکل تعریف می‌شود:

$$\delta F(X) = \frac{F_h - F(X)}{F_h} \quad (10)$$

$F(X)$ بردار فرکانس طبیعی پیش‌بینی شده از مدل تحلیلی و $X^T = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ بردار متغیرهای آسیب است که شدت آسیب x_i را درهمه‌ی اعضای سازه نشان می‌دهد [۶]:

$$MDLAC(X) = \frac{|\Delta F^T \delta F(X)|^2}{(\Delta F^T \Delta F)(\delta F(X)^T \delta F(X))} \quad (11)$$

در اینجا جهت بالا بردن حساسیت این تابع هدف، از روابط زیر استفاده شده است [۷]:

$$obj(x) = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} \frac{\min_{obj}(f_{x_i}, f_{d_i})}{\max_{obj}(f_{x_i}, f_{d_i})} \quad (12)$$

که در آن f_{x_i} و f_{d_i} مولفه‌های i ام بردارهای $F(X)$ و F_d هستند. برای دقت و حساسیت بیشتر از تابع هدف ECBI که ترکیبی از obj و MDLAC است، استفاده می‌شود.

$$ECBI(x) = \frac{1}{2} (obj(x) + MDLAC) \quad (13)$$

در مسئله‌ی بهینه‌سازی، تابع هدف جهت تشخیص خرابی، بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۷].

$$F(x) = 1 - ECBI(x) \quad (14)$$

تابع هدف سوم مبتنی بر معیار MAC بوده که برگرفته از اختلاف پاسخ مود شکل خراب واقعی و فرضی می‌باشد [۸].

$$MAC = \frac{|\Phi_{j,d}^T \Phi_{j,up}|^2}{(\Phi_{j,d}^T \Phi_{j,d})(\Phi_{j,up}^T \Phi_{j,up})} \quad (15)$$

$$F = \sum_{j=1}^{N_m} 1 - MAC \quad (16)$$

در رابطه‌ی فوق $\Phi_{j,d}$ و $\Phi_{j,up}$ به ترتیب شکل مودی سازه‌ی آسیب‌دیده و شکل مودی به‌روز شده‌ی سازه در مود j ام می‌باشد. تابع هدف چهارم مبتنی بر معیار انرژی کرنشی بوده که برگرفته از اختلاف پاسخ مود شکل خراب واقعی و فرضی می‌باشد. هنگامی که عضو یا اعضای از سازه دچار آسیب گردد، مود شکل‌های آن‌ها نیز تغییر کرده و سبب تغییر در انرژی کرنشی می‌گردد. در این صورت انرژی کرنشی ذخیره شده در سازه‌ی آسیب‌دیده و سازه‌ی سالم در فرم اجزاء محدود بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$U_{j,h} = \frac{1}{2} \Phi_{j,h}^T K_h \Phi_{j,h} \quad (17)$$

$$U_{j,d} = \frac{1}{2} \Phi_{j,d}^T K_h \Phi_{j,d} \quad (18)$$

که در آن‌ها $U_{j,d}$ و $U_{j,h}$ به ترتیب انرژی کرنشی سازه‌ی سالم و آسیب‌دیده در مود j ام و K_h ماتریس سختی سازه‌ی سالم می‌باشند. با توجه به اینکه ماتریس سختی سازه‌ی آسیب‌دیده موجود نمی‌باشد جهت بدست آوردن انرژی کرنشی سازه‌ی آسیب‌دیده ماتریس سختی سازه‌ی سالم جایگزین می‌شود.

برای تشخیص آسیب در اعضای سازه مقدار انرژی کرنشی عضو سازه سالم و آسیب‌دیده توسط تابع هدف F بصورت زیر مقایسه می‌گردد:

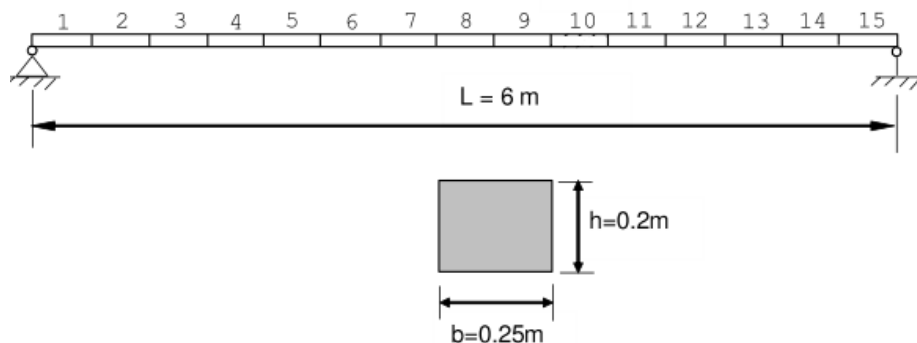
$$F = \sum_{j=1}^{N_m} \left| \frac{U_{j,up} - U_{j,d}}{U_{j,d}} \right| \quad (19)$$

۵- مثال عددی

بمنظور تشخیص آسیب در سازه‌ها، خرپای ۲۱ عضوی و تیر ۱۵ عضوی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بازسازی پاسخ سازه‌ی آسیب‌دیده مدل اجزای محدود سازه‌ها طی فرایندی تکراری به روز رسانی شده است. در این تحقیق فرایند به روز رسانی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته تحت چند تابع هدف مختلف صورت گرفته است. تمامی مراحل تشخیص آسیب در سازه، با استفاده از برنامه‌نویسی در MATLAB انجام گرفته و با توجه به تصادفی بودن عملکرد الگوریتم فاخته، هر مورد از تشخیص آسیب توسط الگوریتم فاخته، چندین بار اجرا شده است.

مثال شماره ۱:

سازه‌ی اول مورد مطالعه، یک تیر با تکیه‌گاه ساده‌ی ۱۵ عضوی می‌باشد که طول آن ۶ متر و ضخامت و پهنای مقطع تیر بتنی به ترتیب ۲/۲۵ و ۲۵ متر است. مدول الاستیسیته، جرم مخصوص و ممان اینرسی اعضا به ترتیب $10^4 \times 3/2 \text{ pa}$ ، 2500 kg/m^3 و $0,00166 \text{ m}^4$ می‌باشد [۹]. جدول (۱) حالات مختلف خرابی در نظر گرفته شده برای تیر ۱۵ عضوی را نشان می‌دهد.

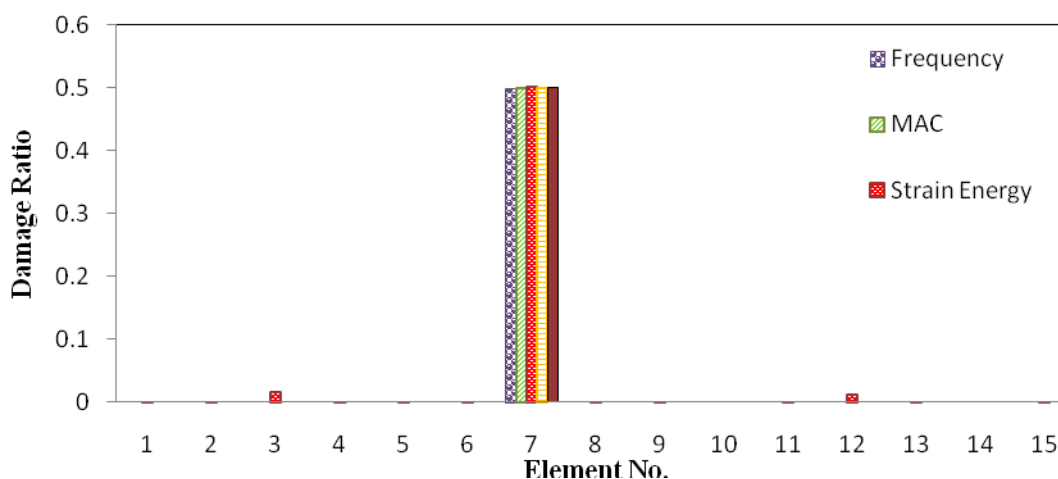


شکل ۱: تیر ۱۵ المانی [۹]

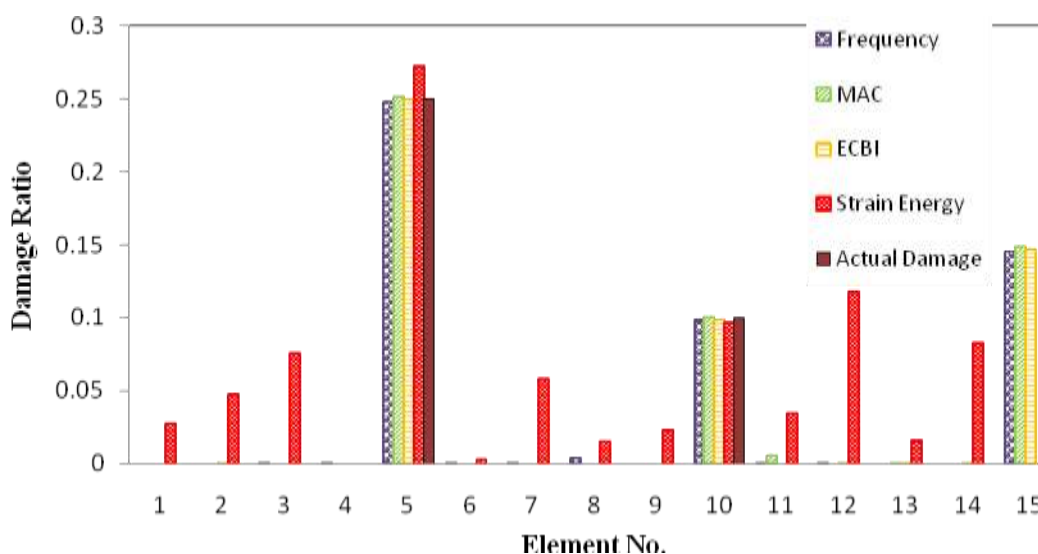
جدول ۱: سناریوهای آسیب در تیر ۱۵ المانی

سناریوی آسیب	شماره المان آسیب‌دیده	درصد خرابی المان آسیب‌دیده
۱	۷	۵۰
۲	۵	۲۵
	۱۰	۱۰
	۱۵	۱۵

در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج حاصل از تشخیص آسیب در تیر ۱۵ المانی که با استفاده از الگوریتم فاخته و تحت دو سناریوی مختلف انجام گرفته است، مشاهده می‌شود.



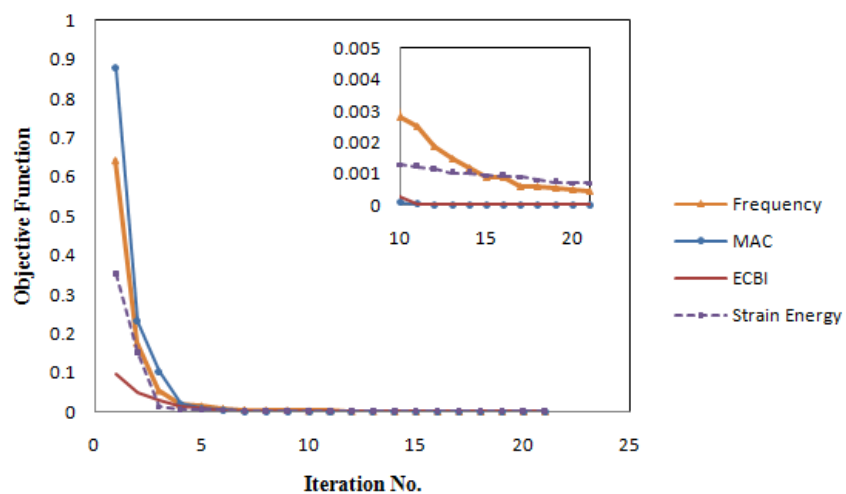
شکل ۲: پیش‌بینی موقعیت و شدت دقیق آسیب در تیر ۱۵ عضوی در سناریوی



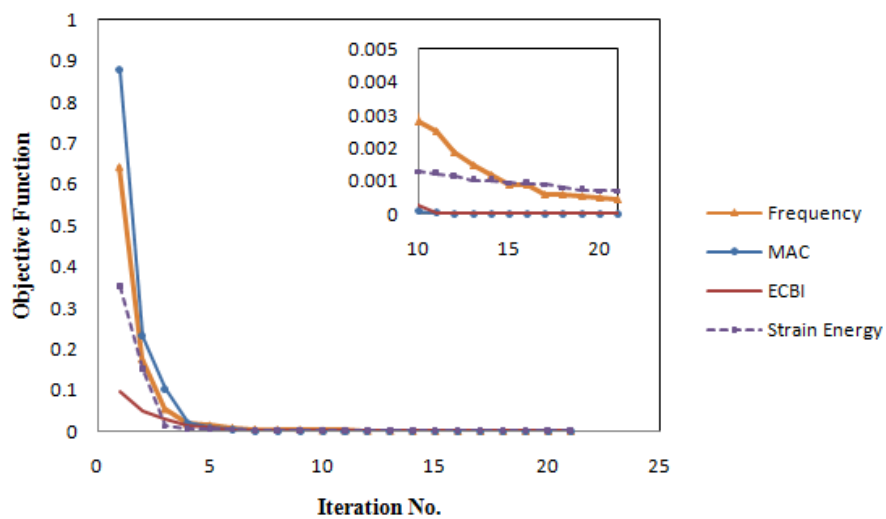
اول

شکل ۳: پیش‌بینی موقعیت و شدت دقیق آسیب در تیر ۱۵ عضوی در سناریوی دوم

همانطور که از نمودارهای نتایج حاصل از تشخیص آسیب در تیر ۱۵ عضوی مطابق شکل ۲ و ۳ نتیجه می‌گردد، در هر دو سناریو تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی نتوانسته در تشخیص موقعیت آسیب چندان موفق عمل کند. خصوصاً مشاهده می‌شود که در سناریوی سوم با افزایش تعداد اعضای آسیب‌دیده با درصد خرابی پائین‌تر، این تابع هدف در اکثر اعضای سالم سازه نیز آسیب تشخیص داده است. ۳ تابع هدف دیگر موقعیت و شدت آسیب را تقریباً بدرستی تشخیص داده‌اند اما تابع هدف ECBI نتوانسته موقعیت آسیب را با دقت بالاتری بدست آورد. در حالیکه سایر توابع هدف درصدی ناچیز آسیب در بعضی از اعضا شناسایی نموده‌اند. در شکل‌های ۴ و ۵، سرعت و دقت همگرایی توابع هدف با استفاده از نمودارهای همگرایی الگوریتم فاخته بر اساس هر یک از این توابع مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم فاخته با استفاده از توابع هدف MAC و ECBI سرعت و دقت همگرایی بالاتری دارد.



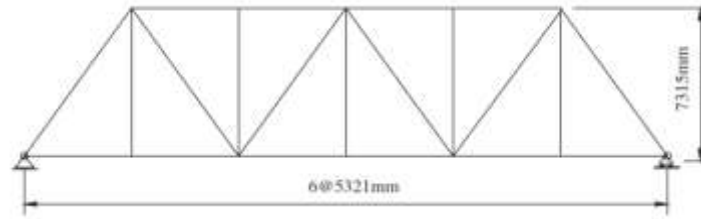
شکل ۴: نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای سناریوی اول آسیب در تیر ۱۵ عضوی



شکل ۵: نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای سناریوی دوم آسیب در تیر ۱۵ عضوی

مثال شماره ۲:

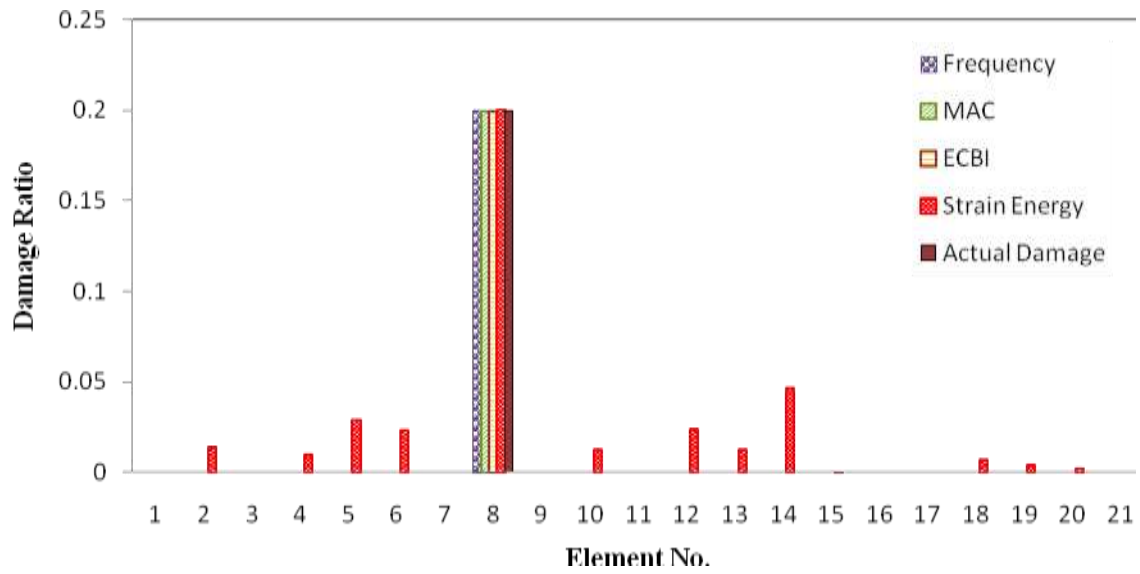
خرپای ۲۱ عضوی شکل (۶) با مدول الاستیسیته ای برابر ۲۰۰Gpa، جرم مخصوص 7800 kg/m^3 و اعضای با سطح مقطع 0.05 مترمربع مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۲) حالات خرابی در نظر گرفته شده برای خرپا را نشان می دهد.



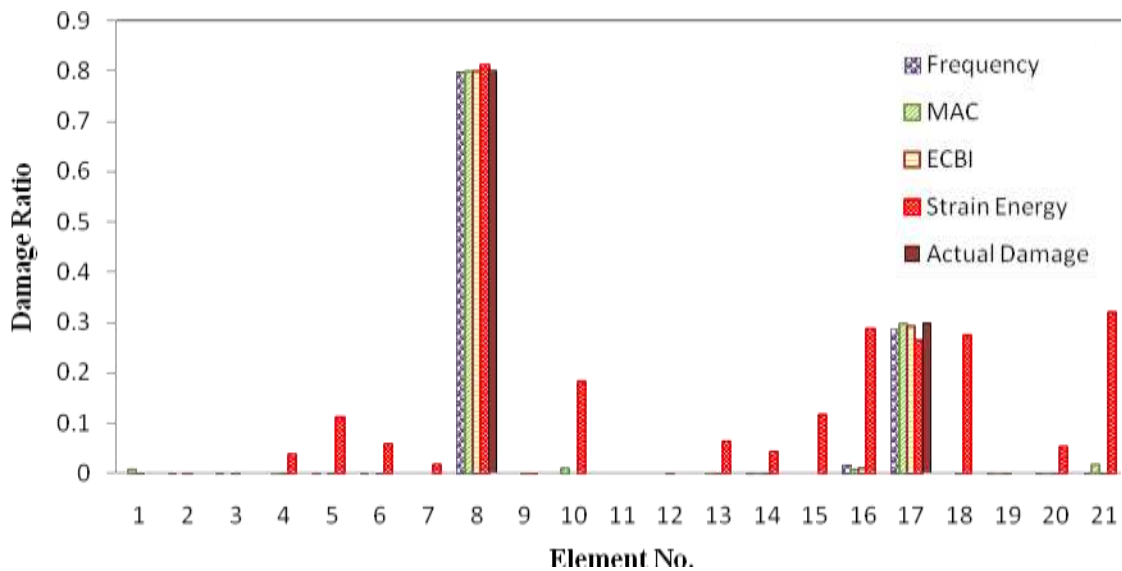
شکل ۶: خرابای ۲۱ عضوی

جدول ۲: سناریوهای آسیب در خرابای ۲۱ عضوی

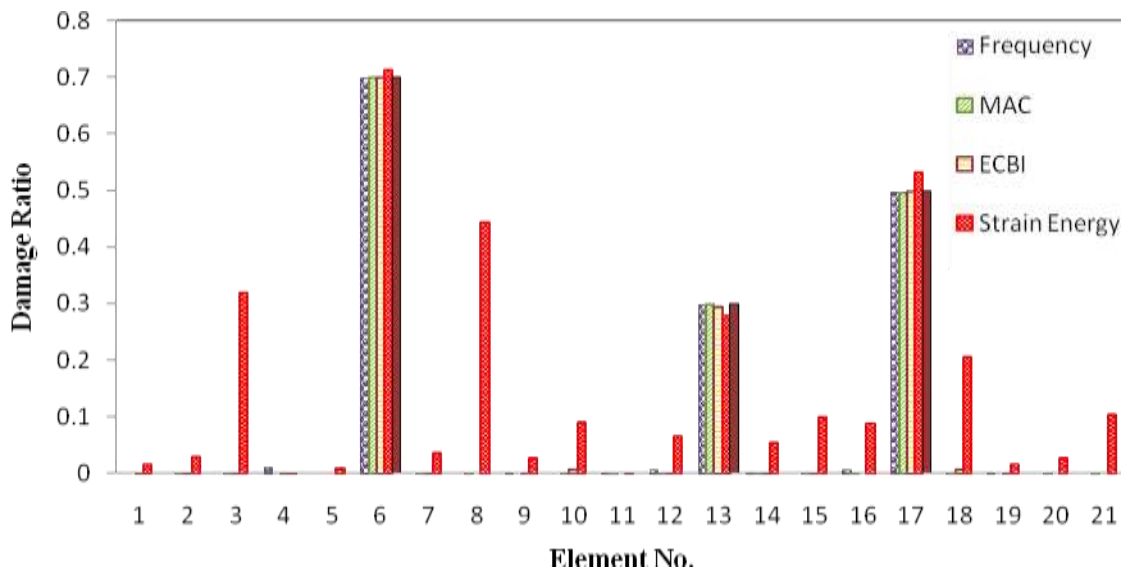
سناریوی آسیب	شماره المان آسیب- دیده	درصد خرابی المان آسیب دیده
۱	۸	۲۰
۲	۸	۸۰
	۱۷	۳۰
۳	۶	۷۰
	۱۳	۳۰
	۱۷	۵۰



شکل ۷: پیش بینی موقعیت و شدت دقیق آسیب در خرابای ۲۱ المانی در سناریوی اول

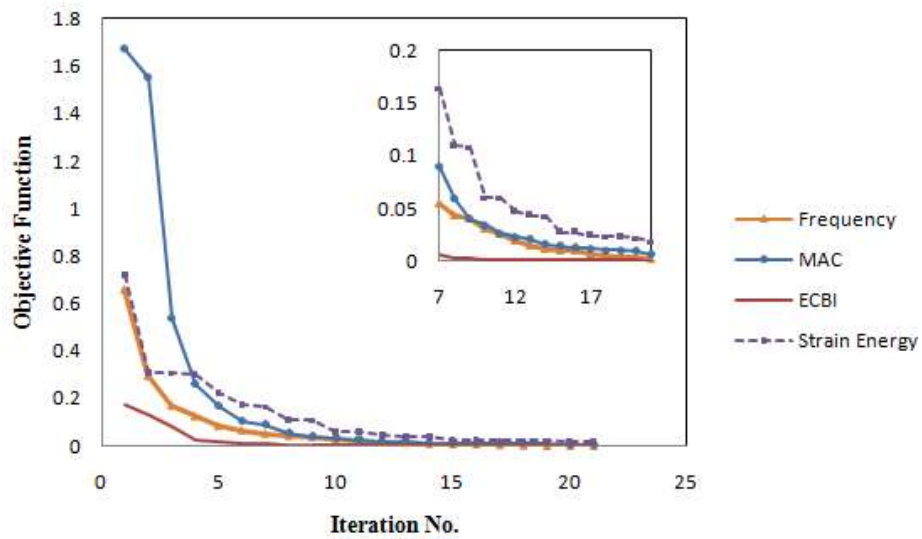


شکل ۸: پیش‌بینی موقعیت و شدت دقیق آسیب در خرابی ۲۱ المانی در سناریوی دوم

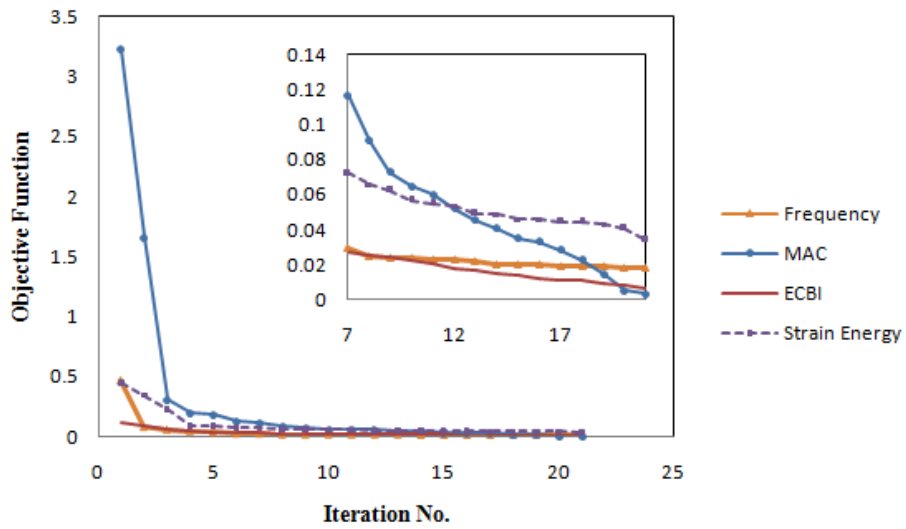


شکل ۹: پیش‌بینی موقعیت و شدت دقیق آسیب در خرابی ۲۱ المانی در سناریوی سوم

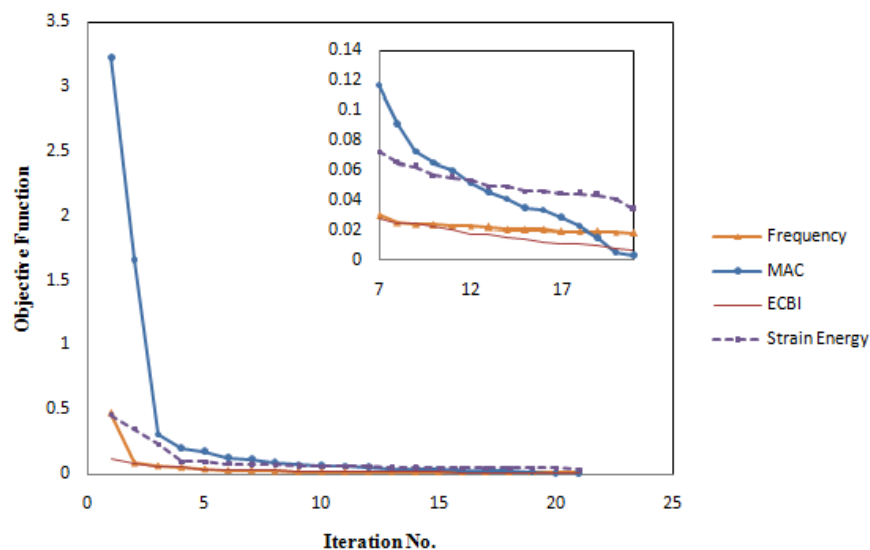
در شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج حاصل از تشخیص آسیب در خرابی ۲۱ عضوی که با استفاده از الگوریتم فاخته و سه سناریوی آسیب مختلف انجام گرفته، بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این مثال نیز تابع هدف مبتنی بر انرژی کرنشی نتوانسته موقعیت آسیب را بدرستی تشخیص دهد. تابع MAC، تابع هدف مبتنی بر فرکانس و ECBI موقعیت و شدت آسیب را تقریباً بدرستی شناسایی کرده‌اند. جهت مقایسه سرعت و دقت همگرایی توابع هدف از نمودارهای همگرایی الگوریتم فاخته بر اساس این توابع در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ استفاده شده است. مشاهده می‌شود که در این مثال نیز دقت و سرعت الگوریتم فاخته با استفاده از تابع هدف ECBI به مراتب بیشتر از سایر توابع هدف است.



شکل ۱۰: نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای سناریوی اول آسیب در خرابی ۲۱ المانی



شکل ۱۱: نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای سناریوی دوم آسیب در خرابی ۲۱ المانی



شکل ۱۲: نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای سناریوی سوم آسیب در خرپای ۲۱ المانی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تشخیص آسیب در سازه‌ها شامل تعیین موقعیت و میزان آسیب در تیر ۱۵ عضوی و خرپای ۲۱ عضوی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته انجام گرفت. در واقع الگوریتم فاخته با همگرا نمودن توابع هدف به سمت صفر، مدول الاستیسیته اعضا و در پی آن ماتریس سختی و پاسخ‌های دینامیکی سازه رابه روز رسانی کرده و بدین ترتیب محل و شدت خرابی در سازه‌ها تعیین گردیده است. در این راستا عملکرد چهار تابع مختلف که مبتنی بر پاسخ‌های آنالیز مودال بودند، بررسی شده است.

در مجموع، نتایج حاصل از حل مثالهای عددی بر اساس سناریوهای مختلف آسیب، بیانگر این مطلب است که توابع هدفی که بر اساس معیار MAC و ECBI می‌باشند نسبت به سایر توابع هدف، در شناسایی موقعیت و شدت آسیب سازه عملکرد دقیقتری داشته‌اند. علاوه بر این در مثالهای عددی مشاهده می‌شود که الگوریتم فاخته با استفاده از تابع هدف ECBI سرعت و دقت همگرایی بالاتری دارد. قابل ذکر است که توابع هدف مبتنی بر فرکانس و انرژی کرنشی در صورتیکه تعداد المان مشکوک به آسیب محدود می‌باشند، عملکرد مناسبی دارد.

همچنین در شناسایی آسیب فرض شده است که تنها اطلاعات ده مود اول سازه در دسترس خواهد بود، بنابراین الگوریتم فاخته با استفاده از تابع هدف مبتنی بر معیار MAC قادر به شناسایی محل و شدت دقیق آسیب با استفاده از اطلاعات ناقص مودی می‌باشد.

مراجع

[1] Khoshnoudian, F. and Esfandiari, A.; "Structural damage diagnosis using modal data"; *Scientia Iranica*, 18(4) (2011) 835-860.

[2] Majumdar, A. and Maiti, D.K.; "Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization"; *Applied Mathematics and Computation*, 218 (2012) 9750-9772.

- [3] Mares, C. and Surace, C.; "An application of Genetic algorithms to identify damage in elastic structures"; *Journal of sound and vibration*, 192(2) (1996) 195-215.
- [4] kang, F. and Li, J. ; " Damage detection based on improved particle swarm optimization using vibration data"; *Applied soft computing*, 12(2012)2329-2335
- [5] Rajabioun, R.; " Cuckoo Optimization Algorithm "; *Applied Soft Computing*, 11(8) (2011) 5508-5518
- [6] Seyedpoor, S.M.;"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*, s 47 (2012) 1-8.
- [7] Tabrizian, Z. and Afshari, E. and Ghodrati Amiri, GH. And Hossein Ali Beigy, M and Pourhoseini Nejad, S.M. ; " new damage detection method: Big Bang-Big Crunch (BB-BC) algorithm"; *Shock and Vibration*, 20 (2013) 633–648
- [8] Perera, R. and Fang, S.E.;"Multi-Objective damage identification using particle swarm optimization techniques"; *Multi-Objective Swarm Intelligent Systems*, 261(2010)179–207
- [9] Xin Ren, W. and Bing Chen, H.;" Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method"; *Engineering Structures* 32 (2010) 2455_2465
- [10] Hua, X.G. and Ni, Y.Q. and Ko, J.M.;" Adaptive regularization parameter optimization in output-error-based finite element model updating"; *Mechanical Systems and Signal Processing* 23 (2009) 563– 579