پایش سلامت سازه‌ای و تشخیص آسیب پل فولادی بر اساس اطلاعات مودال از طریق الگوریتم رقابت استعماری

فریدون امینی[1]، میرحمیدحسینی [2]

(دریافت ۹۰/۴/۱۵، پذیرش ۹۱/۵/۲۳)

چکیده

این مطالعه به معرفی یک روش برای تشخیص موقعیت و محاسبه مقدار خرابی در سازه‌ها بر اساس فرکانس‌های طبیعی و شکلهای مدی سازه آسیب‌دیده با بهره‌گیری از یک الگوی بهینه‌سازی می‌پردازد. روش پیشنهادی موقعیت و مقدار خرابی (خرابی‌ها) سازه‌ها را با استفاده از بهینه‌سازی تابع هدف (تابع خرابی) با الگوریتم رقابت استعماری تعیین می‌کند. کارآیی روش پیشنهادی با به‌کارگیری یک مثال عددی بررسی گردیده است: مثال یک پل دو دهانه فولادی است با در نظرگیری و بدون درنظرگیری اثر اغتشاش در اطلاعات مودال که شامل یک یا چند خرابی باشد. نتایج به‌دست‌آمده به وضوح تعیین می‌کند که روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش توانمند و مقاوم برای تشخیص آسیب سازه‌ای در سازه‌ها در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی

پایش سلامت سازه‌ای، تشخیص آسیب، الگوریتم رقابت استعماری، اطلاعات مودال

Structural Health Monitoring and Damage Detection of Steel Bridge Based on Modal Data via Colonial Competitive Algorithm

F. Amini1, M. H. Hosseini2

ABSTRACT

This study is intended to present a method for the localization and evaluation of damage in structures based on changes in natural frequencies and mode shapes of the damaged structures using an optimization approach. The proposed method localizes and evaluates the damage (or damages) of structures using optimization of a objective function (damage function) by colonial competitive algorithm. The performance of the proposed method has been verified using a numerical example, namely a two span steel bridge with and without noise in the modal data and containing one or several damages. The obtained results clearly reveal that the proposed method can be viewed as a powerful and robust method for structural damage detection in structures.

Keywords

Structural Health Monitoring; Damage Detection; Colonial Competitive Algorithm; Modal Data

۱. استاد دانشکده مهندسی عمران ،دانشگاه علم وصنعت ایران ، famini@iust.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی دکتری زلزله دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه علم وصنعت ایران، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران ، mirhamid.hosseini@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

پایش سلامت سازه‌ای روندی برای بدست آوردن اطلاعات دقیق لحظه‌ای از شرایط و عملکرد سازه‌ای می‌باشد. هدف اصلی پایش، آشکارسازی رفتارهای غیرمعمول سازه است که بیانگر شرایط سازه‌ای نامطلوب می‌باشد. داده‌های بدست‌آمده از پایش برای بهینه کردن عملکرد، نگهداری، تعمیر و جایگزینی سازه بر اساس داده‌های قابل اعتماد و اندازه گیری شده هدف، به‌کار می روند. در مبحث پایش سلامت سازه‌ای آسیب به عنوان تغییراتی که در طول بهره‌برداری از سازه رخ می‌دهد تعریف می‌گردد و شناسایی آسیب به کلیه روش‌ها و تکنیک‌هایی اطلاق می‌گردد که وجود خرابی را تشخیص و موقعیت و میزان خرابی را بیان می‌کند [۱و۲].

در سالهای اخیر، با پیشرفتهای صورت گرفته در عرصه علمی، روش‌های پایش از راه دور با استفاده از لیزر، سنسورهای فیبرنوری، تکنیک‌های جمع‌آوری داده‌ها از راه دور و تکنیک‌های پردازش صورت می‌گیرد. با استفاده از این تکنولوژی تعداد زیادی از سازه‌ها شامل پل‌ها و سازه‌های زیربنایی و حیاتی پایش شده‌اند [۳].

در زمینه تشخیص آسیب در پلها، چن و شاه [۴] یک پایه پل را با استفاده از شبکه پس‌انتشار خطا مورد مطالعه قرار دادند. ورودی‌های این شبکه عصبی شتابهای بدست‌آمده از ۴ شتابنگاشت است که دو عدد از آنها به صورت عمودی و دو عدد به صورت افقی بر روی پایه پل نصب شده‌اند. خروجی شبکه عصبی شامل فرکانس، جابه‌جایی و شکل مدی می‌باشد. شبکه با استفاده از داده‌های بدست‌آمده در شرایط مختلف آموزش می‌بینند: قبل از خرابی و بعد از خرابی. با مقایسه نتایج، آنها نتیجه گرفتند که شبکه عصبی با موفقیت تغییرات در پارامترهای پایه را بعد از خرابی آشکار می‌کند.

امروزه روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها به دو دسته روش‌های استاتیکی و روش‌های دینامیکی تقسیم می‌گردد. در روش‌های استاتیکی با تکیه بر اندازه‌گیری کرنش و جابجایی سازه تحت اثر بارهای استاتیکی مشخص و استفاده از مدل المان محدود به روزشده، اقدام به تعیین تغییرات در تغییر شکل‌ها، سختی و ظرفیت مقطعی حمل بار سازه‌ها می‌نماید. این گونه روش‌ها به صورت گستردهای برای نظارت و ارزیابی سلامت پل‌ها استفاده می‌شود [۵و۶]. از معایب روش های غیر مخرب استاتیکی می‌توان به مواردی چون : نیاز به حجم انبوه از داده های اندازه گیری شده ، نیاز به مدل المان محدود به روز شده با مشخصات دقیق مصالح ، نیاز به تست بار استاتیکی که موجب ایجاد توقف در سرویس دهی سازه می شود، اشاره کرد. از این‌رو امروزه روشهای دینامیکی مورد توجه قرار دارند.

روش‌های دینامیکی مبتنی بر بررسی تغییرات مشخصات ارتعاشی (دینامیکی) سیستم سازه هستند. اساس تئوری این روش در این حقیقت نهفته است که خرابی و آسیب موجب تغییرات در مشخصات دینامیکی سازه می‌شوند. این روش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- روش‌های بر پایه سیگنال : با به‌کارگیری رویکردهای مناسب پردازش سیگنال اقدام به شناسایی خرابی می‌کنند. بسخیروم و همکاران [۷] با استفاده از تبدیل موجک روشی را برای پایش سلامتی سازه یک پل ارائه نموده‌اند. برای این منظور یک سازه پل راه‌آهن به دهانه ۱۹/۸ متر را در دو حالت آزمایشگاهی و مدل‌سازی بصورت المان محدود در سطوح مختلف خرابی بررسی کرده‌اند.
- روش‌های بر پایه مودال : بر اساس مشخصه های مودال از جمله فرکانس‌های سازه، نسبت میرایی و شکل‌های مدی می باشند. از آنجا که مشخصه‌های مودال نسبت به تغییرات در سازه حساس می‌باشند، دارای قابلیت آشکارسازی خیلی ساده برای به کارگیری هستند. دوبلینگ و وردن [۸و۹] مرور جامعی بر روی شناسایی آسیب بر اساس خصوصیات مودال انجام داده‌اند. پررا و تورس [۱۰] خرابی در تیرها را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک بررسی نمودند و روش ارائه شده را بر روی نتایج عددی و

Archive of SID

www.SID.ir

آزمایشگاهی به کار برده‌اند و موقعیت و مقدار آسیب را تا حدودی در سازه تشخیص داده‌اند و همچنین لیسیزکای [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشرفته رایج و بهرگیری از مدل سازی عددی محل و مقدار آسیب در تیر کنسول و دو دهانه و یک قاب بتنی، روشی برای تشخیص خرابی بر اساس تابع پاسخ فرکانسی سازه ارائه نمودند.

در این مقاله، به منظور تعیین محل و همچنین شدت آسیب در پلهای فولادی ، از الگوی بهینه‌یابی رقابت استعماری استفاده گردیده است. تابع خسارت (تابع هدف) بر اساس اطلاعات مودال سازه آسیب‌دیده تعریف می‌گردد.

۲- رابطه‌سازی مسئله

۲-۱- تابع خسارت

مشخصه‌های مودال یک سازه آسیب‌ندیده به روش مقادیر ویژه با معادله زیر تعیین می‌گردد:

$$[\mathbf{K}^{ud} - \omega_i^2 \mathbf{M}]\mathbf{\Phi}_i = 0 \quad i = 1,2,...,m \qquad (۱)$$

که $\mathbf{M}$ ماتریس جرم و $\mathbf{K}^{ud}$ ماتریس سختی سازه آسیب‌ندیده می‌باشد. ω_i فرکانس طبیعی وابسته به شکل مدی $\mathbf{\Phi}_i$ است و m تعداد مدهای سازه است.

برای مدل‌سازی آسیب در سازه‌ها از روش معکوس تشخیص آسیب با استفاده از یک دسته پارامتر وابسته به آسیب مختص هر المان در مدل استفاده می‌گردد. به این-منظور آسیب با متغیر d که مقداری بین صفر برای المان آسیب‌ندیده و یک برای المان گسیخته دارد، بیان می‌گردد. آسیب با کاهش خواص مواد بیان می‌گردد. در این مقاله مدول الاستیسیته مواد برای تعیین مقدار آسیب در اعضا انتخاب گردیده است.

$$E_e^d = (1-d_e)E_e, \quad 0 \le d_e \le 1 \qquad (۲)$$

که E_e^d و E_e به ترتیب مدول الاستیسیته آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده المان e ام سازه می‌باشد.

بنابراین معادله (۱) را برای سازه آسیب‌دیده میتوان به شکل زیر نوشت:

$$[\mathbf{K}^d - (\omega_i^d)^2 \mathbf{M}]\mathbf{\Phi}_i^d = 0 \quad i = 1,2,...,m \qquad (۳)$$

که $\mathbf{K}^d$ ماتریس سختی سازه آسیب‌دیده می‌باشد. ω_i^d و $\mathbf{\Phi}_i^d$ به‌ترتیب فرکانس طبیعی و شکل مدی i ام سازه آسیب‌دیده می‌باشد.

با جاگذاری اطلاعات دینامیکی اندازه‌گیری شده از سازه آسیب‌دیده در معادله (۳)، تشخیص آسیب به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته میشود. به علت پیچیدگی در این‌گونه مسائل، روشهای بهینه‌سازی کلاسیک نتایج مناسبی ندارند. از این‌رو استفاده از روشهای تکاملی و پیشرفته مانند الگوریتم رقابت استعماری نتایج قابل اطمینانی در پی خواهد داشت. الگوریتم رقابت استعماری با یافتن بهترین نقطه به منظور کمینه کردن تابع خسارت جواب نهایی مسئله را تعیین می‌کند.

$$F = f(d_1, d_2, ..., d_n) \qquad (۴)$$

که در آن:

$$0 \le d_1 \le 1, \ 0 \le d_2 \le 1, ..., 0 \le d_n \le 1 \qquad (۵)$$

به منظور ساختن تابع خسارت، همه خروجی‌های سازه‌ای که در مقابل متغیرهای آسیب حساسیت بالایی دارند، می‌بایست محاسبه گردند.

با جاگذاری پارامترهای مودال اندازه‌گیری‌شده سازه آسیب‌دیده در معادله (۳) بردار $\mathbf{R}_i$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathbf{R}_i(d_1, d_2, ..., d_n) = [\mathbf{K}^d - (\omega_i^m)^2 \mathbf{M}]\mathbf{\Phi}_i^m \qquad (۶)$$

که $i = 1,2,...,r$

ω_i^m و $\mathbf{\Phi}_i^m$ به‌ترتیب فرکانس طبیعی و شکل مدی i ام موارد اندازه‌گیری هستند و i تعداد مدهای درنظر گرفته‌شده برای تشخیص آسیب هستند.

بنابراین، موضوع تشخیص آسیب می‌تواند به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی رابطه‌سازی گردد که هدف کمینه کردن تابع خسارت زیر می‌باشد:

$$F = \sum_{i=1}^{r} \left\| \mathbf{R}_i(d_1, d_2, ..., d_n) \right\|^2 \qquad (۷)$$

که $\| \ \|$ طول اقلیدسی بردار $\mathbf{R}_i$ را نمایش می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir

۲-۲- بهینه‌سازی (الگوریتم رقابت استعماری)

الگوریتم رقابت استعماری، همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می شود. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگیر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگری، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آنها را کنترل می‌کند.

سیاست جذب (همگون‌سازی) و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. مطابق سیاست جذب که به صورت تاریخی، توسط کشورهای استعمارگری همچون فرانسه و انگلیس، در مستعمراتشان اعمال می‌شد، کشورهای استعمارگر با استفاده از روش‌هایی همچون احداث مدارس به زبان خود، سعی در از خود بی خود کردن کشور مستعمره، با از میان بردن زبان کشور و فرهنگ و رسوم آن داشتند. در ارائه این الگوریتم، این سیاست با حرکت دادن مستعمرات یک امپراطوری، مطابق یک رابطه خاص صورت می‌پذیرد. اگر در حین حرکت، یک مستعمره، نسبت به استعمارگر، به موقعیت بهتری برسد، جای آن دو با هم عوض می‌شوند. در ضمن قدرت کل یک امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت میانگین مستعمرات آن تعریف می شود. مطابق رقابت استعماری هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، حذف خواهد شد. این حذف شدن، به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد. بدین معنی که به مرور زمان، امپراطوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست داده و امپراطوری‌های قویتر، این مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند [۱۲].

به منظور حل (بهینه‌سازی) معادله (۷) یک آرایه از متغیرهای مسئله را که باید بهینه شوند، ایجاد می‌کنیم. این آرایه را یک کشور به‌صورت زیر می‌نامیم:

$$country = [d_1, d_2, ..., d_n], \quad 0 \le d_i \le 1 \qquad (۸)$$

هزینه یک کشور با ارزیابی تابع خسارت (F) یافته می‌شود.

$$cost = F(country) \qquad (۹)$$

برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی، تعداد $N_{Country}$ کشور اولیه را ایجاد می‌کنیم. N_{imp} تا از قدرتمندترین اعضای این کشورها (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع خسارت) را به‌عنوان امپریالیست انتخاب می‌کنیم. باقیمانده N_{col} تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند.

برای تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالیست‌ها، به هر امپریالیست، تعدادی از مستعمرات را که این تعداد، متناسب با قدرت آن است، می‌دهیم. برای انجام این کار، با داشتن هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمالیزه هر امپریالیست را به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$C_j = F(imprialist_j) - \max_i\{F(imprialist_i)\} \qquad (۱۰)$$

که در آن C_j ، هزینه نرمالیزه امپریالیست j ام و $\max_i\{F(imprialist_i)\}$ بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها می‌باشد. قدرت امپریالیست به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$p_j = \left| \frac{C_j}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \qquad (۱۱)$$

که در آن P_j قدرت امپریالیست j ام می‌باشد.

در حقیقت قدرت یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با [۱۳] :

$$N.C._j = round\{p_j . N_{col}\} \qquad (۱۲)$$

که در آن $N.C._j$ تعداد اولیه مستعمرات یک امپراطوری و N_{col} نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه است. $round$ نیز تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد. با در نظر گرفتن $N.C._j$ برای هر امپراطوری، به

Archive of SID

www.SID.ir

این تعداد از کشورهای مستعمره اولیه را به صورت تصادفی انتخاب کرده و به امپریالیست j ام می‌دهیم.

مرحله بعدی الگوریتم بهینه‌سازی اختصاص سیاست جذب است، به‌این‌صورت که امپریالیست، مستعمره‌هایش را به عنوان یک جزء از خودش جذب می‌کند. سیاست جذب با حرکت همه مستعمره‌ها به سمت امپریالیست مدل می‌گردد. جهت حرکت برداری مستعمره‌ها به سمت امپریالیست در طول محورهای مختلف بهینه‌سازی از قبیل d_1 و d_2 صورت می‌گیرد.

در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند (به نقاطی در تابع خسارت برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع خسارت در موقعیت امپریالیست، تولید می‌کنند.) در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند.

قدرت یک امپراطوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن [۱۴]. بدین ترتیب برای هزینه کل یک امپراطوری داریم:

$$T.C._j = F(imprialist_j) + \xi \frac{\sum_{i=1}^{N.C_n} F(colonies\ of\ empire_i)}{N.C_j} \qquad (۱۳)$$

که در آن $T.C._j$ هزینه کل امپراطوری j ام و ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ξ، باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست)، شود.

در الگوی رقابت استعماری، امپراطوری‌های ضعیف به‌تدریج حذف خواهند شد. برای مدل کردن این واقعیت، ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراطوری انتخاب گردیده و برای تصاحب آن، رقابتی را میان کلیه امپراطوری‌ها ایجاد می‌کنیم. برای شروع رقابت، هزینه کل نرمالیزه یک امپراطوری را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$N.T.C._j = T.C._j - \max_i\{T.C._i\} \qquad (۱۴)$$

در این رابطه $N.T.C._j$ هزینه کل نرمالیزه شده امپراطوری j ام می‌باشد. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره توسط هر امپراطوری، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{p_j} = \left| \frac{N.T.C._j}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C._i} \right| \qquad (۱۵)$$

با

داشتن احتمال تصاحب هر امپراطوری، برای اینکه مستعمره مذکور را به صورت تصادفی، ولی با احتمال وابسته به احتمال هر امپراطوری، بین امپراطوری‌ها تقسیم کنیم؛ بردار P را از روی مقادیر احتمال فوق، به صورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$\mathbf{P} = [p_{p_1}, p_{p_2}, ..., p_{p_{N_{imp}}}] \qquad (۱۶)$$

سپس بردار تصادفی R ، هم‌سایز با بردار P را تشکیل می‌دهیم. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر و یک می‌باشند.

$$\mathbf{R} = [r_1, r_2, ..., r_{N_{imp}}]$$
$$r_1, r_2, ..., r_{N_{imp}} \sim U(0,1) \qquad (۱۷)$$

سپس بردار D را به‌صورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$\mathbf{D=P-R} = [D_1, D_2, ..., D_{N_{imp}}]$$
$$= [p_{p_1} - r_1, p_{p_2} - r_2, ..., p_{p_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}}] \qquad (۱۸)$$

با داشتن بردار D، مستعمرات مذکور را به امپراطوری می‌دهیم که اندیس مربوط به آن در بردار D بزرگتر از بقیه می‌باشد. امپراطوری که بیشترین احتمال تصاحب را داشته باشد، با احتمال بیشتری اندیس مربوط به آن در بردار D، بیشترین مقدار را خواهد داشت. [۱۴]

در صورت حذف همه امپراطوری‌ها و باقی ماندن تنها یک امپراطوری، الگوریتم متوقف گشته و بقیه کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد، قرار می‌گیرند. در این دنیای ایده‌آل جدید، همه مستعمرات، توسط یک امپراطوری

Archive of SID

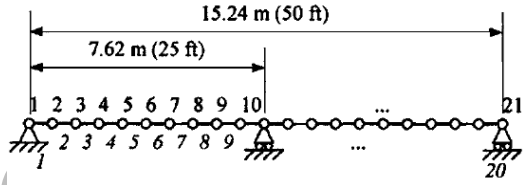
www.SID.ir

واحد اداره می‌شوند و موقعیت‌ها و هزینه‌های مستعمرات، برابر با موقعیت و هزینه کشور امپریالیست است ، که همان جواب بهینه‌سازی مسئله می‌باشد. در غیر این‌صورت به مرحله سیاست جذب بازگشته و الگوریتم را به منظور دست‌یابی به جواب نهایی تکرار می‌کنیم.

۳- مثال عددی

روش پیشنهادی در قسمت قبلی مطابق شکل (۱) در یک پل فولادی دودهانه ساده که تحت تاثیر آسیب‌های سازه‌ای قرار دارد، بررسی گردیده است.

هندسه سازه پل فولادی مورد بررسی مطابق شکل زیر شامل دو دهانه ۷/۶۲ متری است که در مدل المان محدود آن ۲۰ المان و ۲۱ گره در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): هندسه مدل المان محدود پل

مشخصات فولاد به‌کاررفته در مدل‌سازی عبارتند از:

مدول الاستیسیته $E = 2.1\times10^{10}\ kg.f/m^2$

چگالی جرمی $\rho = 800.2\ kg/m^3$

ضریب پواسن $\nu = 0.3$

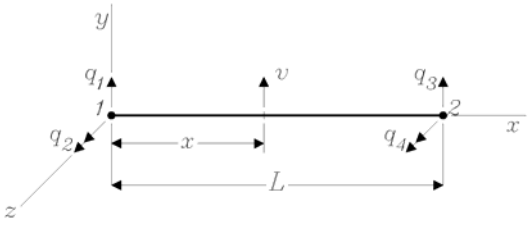
همچنین مقطع به‌کاررفته در پل مذکور $W12\times65$ می‌باشد که مشخصات هندسی آن عبارتند از:

سطح مقطع $A = 123.2\,cm^2$

لنگر دوم سطح حول محور قوی $I = 22185\,cm^4$

برای مشخص نمودن تابع خسارت مطابق رابطه (۷) لازم است ماتریس سختی و ماتریس جرم سازه پل را تعیین نماییم. به این منظور لازم است ابتدا ماتریس سختی و ماتریس جرم یک جزء خمشی را مشخص نماییم.

مطابق شکل (۲) هر المان یک بعدی خمشی در هر گره دو درجه آزادی دارد. مطابق شکل تغییر مکان گره‌ای q_1 و q_3 بیانگر انتقال در امتداد محور y و تغییر مکان گره‌ای q_2 و q_4 بیانگر دوران حول محور z می‌باشد



شکل (۲): عضو خمشی

با درنظرگیری معادله درجه سوم کامل برای تغییرمکان عضو خمشی و محاسبه ماتریس تغییرمکان-کرنش B ماتریس سختی هر المان خمشی به شکل زیر تعیین می‌گردد: [۱۵]

$$K^e = \int_V B^T EB\,dV$$

$$= \frac{EI}{L^3}\begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \qquad (۱۹)$$

به منظور محاسبه ماتریس جرم هر المان خمشی نیز با فرض معادله درجه سوم کامل برای تغییرمکان عضو خمشی خواهیم داشت: [۱۵]

$$M^e = \frac{\rho AL}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

اکنون با محاسبه ماتریس سختی و ماتریس جرم هر المان و روی‌هم‌گذاری آنها ماتریس سختی و ماتریس جرم کل سازه که هر یک ماتریسی ۳۹ در ۳۹ می‌باشد، به‌دست می‌آید.

بعد از تهیه مدل المان محدود، سراغ مدل‌سازی آسیب در سازه می‌رویم. همانگونه قبلا اشاره گردید آسیب در اجزاء سازه با کاهش مدول الاستیسیته المان مدل می‌گردد. به‌این منظور دو حالت مورد انتظار خرابی در المانهای مختلف با سطوح متفاوت در نظر گرفته شده است:

Archive of SID

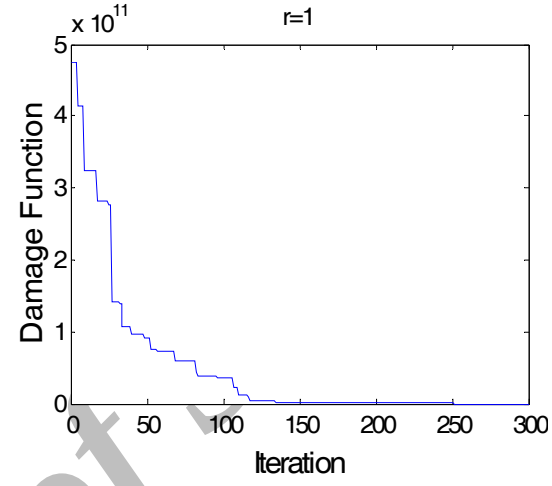
www.SID.ir

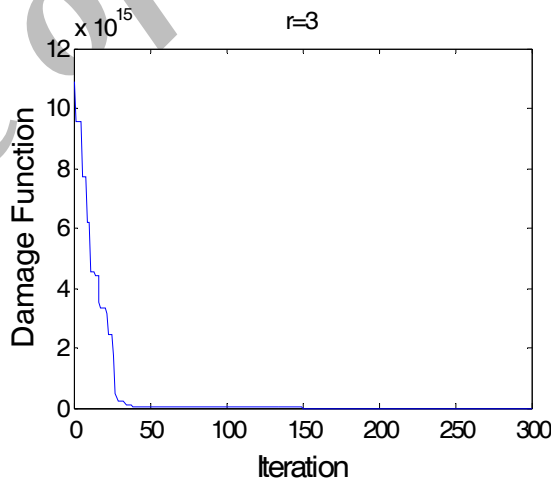
حالت خرابی یک:

مدول الاستیسیته در المان ۷ به میزان ۲۰ درصد کاهش یافته است.

حالت خرابی دو:

مدول الاستیسیته در المان‌های ۴ و ۹ و ۱۳ و ۱۵ به ترتیب به میزان ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و ۱۰درصد کاهش یافته است.



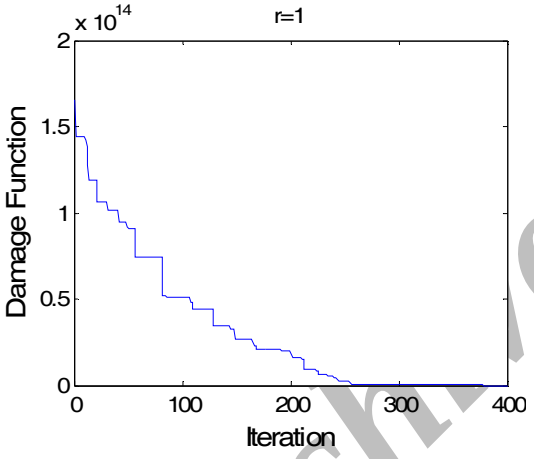


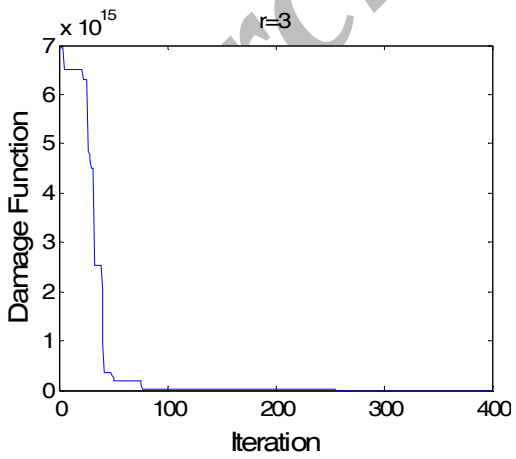
شکل (۳) : منحنی‌های هم‌گرایی

برای حالت خرابی یک

برای محاسبه آسیب در سازه پل با روش پیشنهادی ، الگوریتم با جمعیت اولیه تصادفی کشورها آغاز می‌گردد. هزینه هر کشور با محاسبه تابع خرابی تعیین می‌گردد. سپس با انتخاب تعدادی امپراطوری از میان کشورهای قدرتمند با کمترین مقدار تابع خسارت ، با اعمال سیاست همگون‌سازی موقعیت کشورهای مستعمره و امپراطوری را تغییر می‌دهیم و با اعمال سیاست رقابت استعماری به تدریج امپراطوری‌های ضعیف را حذف می‌کنیم. این حلقه تا باقی ماندن فقط یک امپراطوری به عنوان جواب نهایی ادامه می‌یابد. جمعیت اولیه کشورها $N_{Country}=50$ و جمعیت اولیه امپراطوری $N_{imp}=5$ در نظر گرفته شده است.

منحنی‌های هم‌گرایی برای حالتهای خرابی متفاوت با تعداد مدهای مختلف r در شکهای (۳) و (۴) نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد مدها سرعت هم‌گرایی بهینه‌سازی افزایش چشمگیری می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد المانهای آسیب‌دیده سرعت هم-گرایی کاهش می‌یابد.





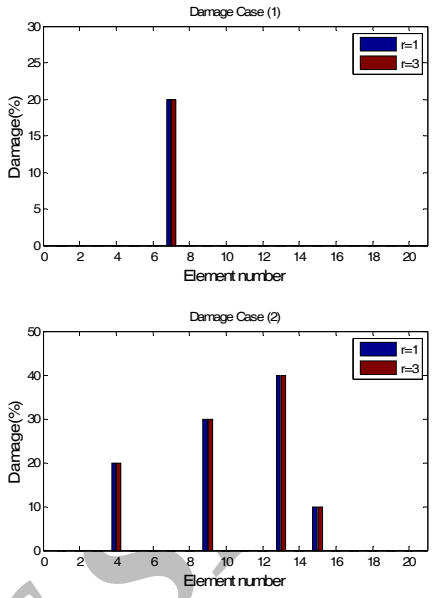
شکل (۴) : منحنی‌های هم‌گرایی

برای حالت خرابی دو

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج تشخیص خرابی در شکل (۵) نمایش داده شده است که در هر دوحالت خرابی به جوابهای دقیق رسیده است.



شکل (۵) : نتایج تشخیص خرابی در سازه پل

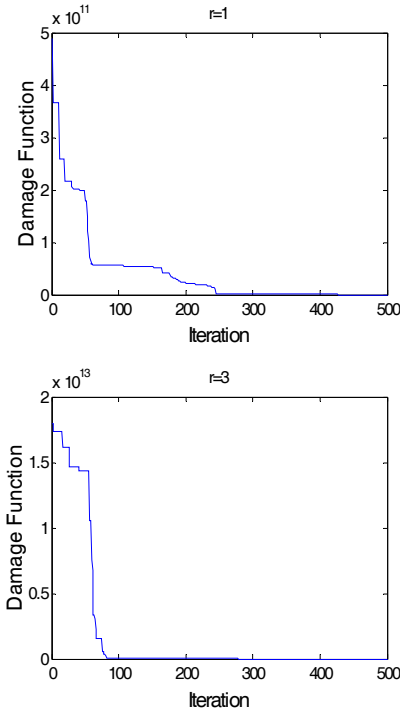
زمان تناوب سازه در سه مد اول در سه سازه آسیب‌ندیده و سازه آسیب‌دیده در دو حالت خرابی یک و دو جهت مقایسه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱) : زمان تناوب سه مد اول سازه

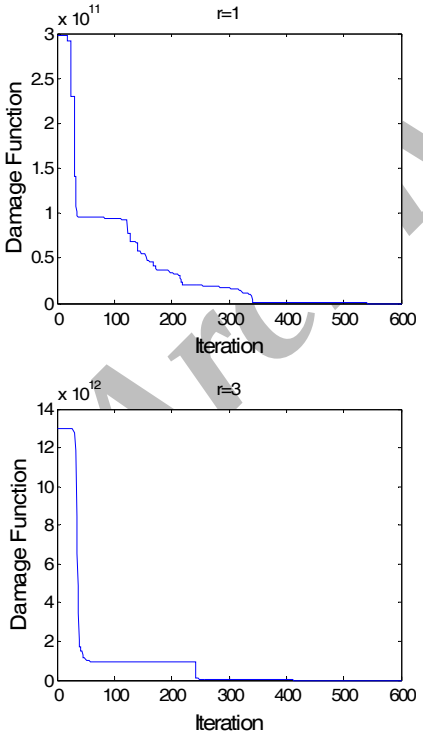
مد	سازه آسیب ندیده	حالت خرابی یک	حالت خرابی دو
اول	۰/۰۵۳۸	۰/۰۵۴۳	۰/۰۵۵۷
دوم	۰/۰۳۴۴	۰/۰۳۴۵	۰/۰۳۵۲
سوم	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۴۱

۳-۱- اثر اغتشاش

معمولا در اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط سنسورها به‌واسطه عوامل مختلف از قبیل خطاهای کالیبراسیون، انسانی و محیطی، همواره اغتشاشاتی وجود دارد که بالطبع می‌بایست اثرات آن در استفاده از این پارامترها لحاظ گردد. در این مقاله نیز به منظور کنترل بازدهی الگوریتم پیشنهادی، اثر اغتشاش بر فرکانس طبیعی سازه به میزان ۳ درصد لحاظ گردیده است.



شکل (۶) : منحنی‌های هم‌گرایی برای حالت خرابی یک با ۳ درصد اثر اغتشاش



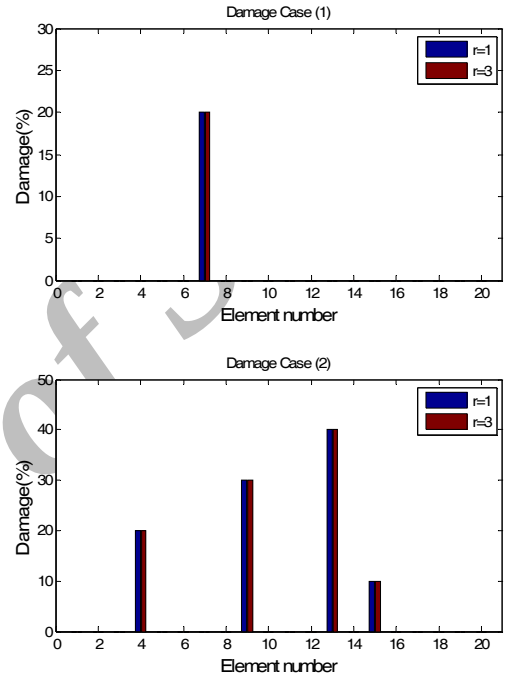
شکل (۷) : منحنی‌های هم‌گرایی برای حالت خرابی دو با ۳ درصد اثر اغتشاش

Archive of SID

www.SID.ir

منحنی‌های هم‌گرایی برای حالتهای خرابی متفاوت با تعداد مدهای مختلف r و در نظرگرفتن ۳ درصد اثر اغتشاش در شکهای (۶) و (۷) نمایش داده شده است. همانگونه که مجددا ملاحظه می‌گردد با افزایش تعداد مدها سرعت هم‌گرایی بهینه‌سازی افزایش چشمگیری می‌یابد.

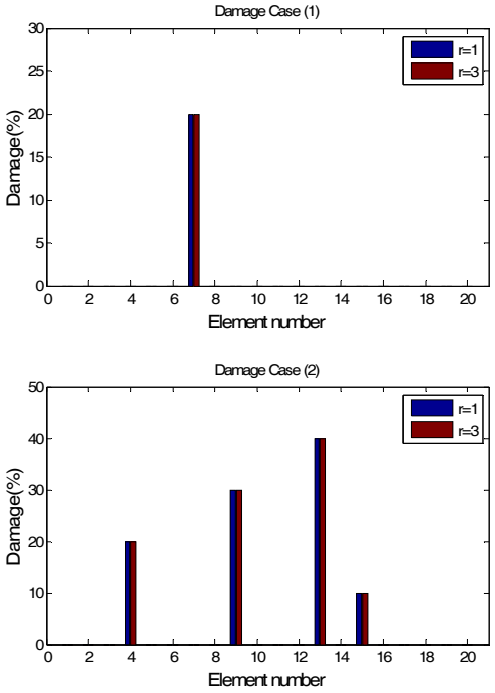
نتایج تشخیص خرابی با در نظر گرفتن ۳ درصد اثر اغتشاش در شکل (۸) نمایش داده شده است که در هر دوحالت خرابی به جوابهای مناسبی رسیده است.



شکل (۸) : نتایج تشخیص خرابی در سازه پل با ۳ درصد اثر اغتشاش

۴- مقایسه نتایج با الگوریتم ژنتیک

به‌منظور مقایسه نتایج روش به‌کار رفته در این مقاله با روشهای دیگر، از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک، روشی جهت بررسی و تحلیل سیستم‌ها با الهام از نظریه تکامل موجودات طبیعی است. در این روش نیز در مرحله اول، یک جمعیت اولیه از جوابهای بالقوه به عنوان نقطه شروع جستجو ایجاد می‌شود. هر عضو جمعیت به یک رشته (کروموزوم) کدگذاری شده تا توسط عملگرهای ژنتیکی قابل تغییر باشد.



شکل (۹) : نتایج تشخیص خرابی در سازه پل با الگوریتم ژنتیک

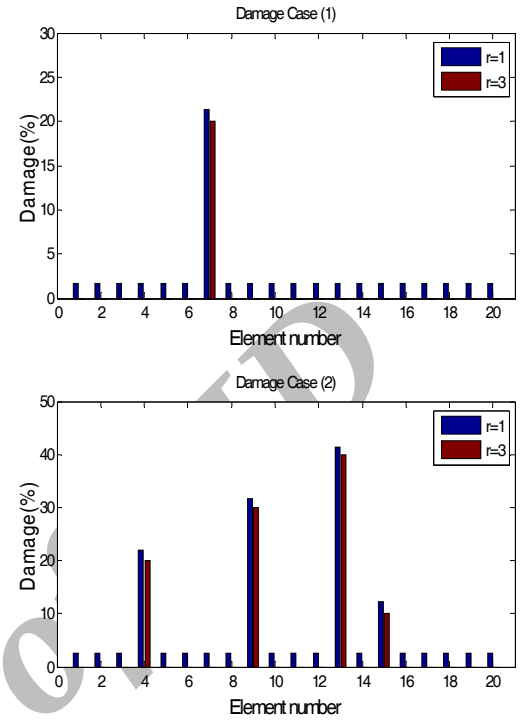
در مرحله بعد کارایی (صلاحیت) هر فرد باتوجه به شرایط مساله ارزیابی می‌شود. بر پایه صلاحیت هر فرد، مکانیزم انتخاب، والدین را برای فرآیند تغییر ژنتیکی انتخاب می‌کند. سیاست انتخاب در نهایت، ضامن بقای افراد اصلح می‌باشد. فرایند مرکب ارزیابی وانتخاب، تولید مثل نام دارد. در مرحله آخر، فرآیند تغییر برای ایجاد جمعیت جدیدی از افراد (فرزندان) از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌کند. این کار با دستکاری اطلاعات ژنتیکی که متعلق به اعضای جمعیت فعلی (والدین) است، انجام می‌گیرد. این فرآیند شامل دو عملگر ترکیب و جهش است.

در این قسمت نیز در ابتدا مقدار جمعیت اولیه همانند الگوریتم رقابت استعماری برابر ۵۰ در نظر گرفته شد که نتایج مطلوبی در بر نداشت. لذا برای بهبود جوابها مقدار جمعیت اولیه ۱۰۰ در نظر گرفته شد. تعداد نسلهایی که برای رسیدن به جواب مناسب در نظر گرفته شده است، ۶۰۰۰ نسل میباشد. همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد در حالت بدون اثر اغتشاش جوابهای دقیق حاصل گردیده است ولیکن مطابق شکل (۱۰) در حالتی‌که ۳

Archive of SID

www.SID.ir

درصد اثر اغتشاش لحاظ گردیده است، با در نظرگیری سه مد نتایج مطلوب به‌دست آمده است اما با در نظرگیری یک مد خطای قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌گردد.



شکل (۱۰) : نتایج تشخیص خرابی در سازه پل با ۳ درصد اثر اغتشاش با الگوریتم ژنتیک

نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای تشخیص خرابی (تعیین موقعیت و مقدار آسیب) بر اساس فرکانس طبیعی و اشکال مدی با استفاده از یک الگوی تکاملی بهینه‌سازی (الگوریتم رقابت استعماری) معرفی گردیده است. به منظور سنجش کارآیی روش پیشنهادی در تشخیص آسیب ، یک سازه پل فولادی مطالعه گردیده است. در بررسی به عمل آمده در دو حالت خرابی مشاهده گردید روش پیشنهادی در تشخیص موقعیت و مقدار آسیب بازدهی بسیار بالایی دارد به طوری‌که با افزایش تعداد مدها به منظور تشخیص آسیب، سرعت هم‌گرایی جوابها بسیار افزایش می‌یابد ولیکن با در نظرگرفتن یک مد نیز جوابهای قابل اطمینان با سرعت هم‌گرایی پایین به‌دست می‌آید. همچنین با در نظر گرفتن اثر اغتشاش که همیشه در سیستمهای جمع‌آوری اطلاعات وجود دارد ، مشاهده گردید تاثیر چندانی در جوابهای الگوی به‌کار رفته نداشته و سرعت هم‌گرایی جوابها را تاحدی کاهش می‌دهد.

همچنین برای مقایسه نتایج روش معرفی شده با روشهای دیگر، از روش الگوریتم ژنتیک نیز برای بهینه‌سازی استفاده شده است که نتایج حاصل از آن در مقایسه با الگوی رقابت استعماری با مقداری خطا روبرو گردید.

مراجع

1-S.W. Doebling, C.L. Farrar, M.B. Prime, D.W. Shevitz,Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS,1996,"Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review".

2-H. Sohn, C.L. Farrar, F.M. Hemez, D.D. Shunk. D.W. Stinemates and B.R. Nadler, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2003, "A review of structural health monitoring literature: 1996-2001".

3-B. Gilsic and D. Inaudi, John Wiley & Sons, 2007, "Fibre optic methods for structural health monitoring".

4-S. Chen and K. Shah, Proceedings of the Eighth Annual Conference of Computing in Civil Engineering, Dallas, 1992, "Neural networks in dynamic analysis of bridges".

5-G. Cardinale and M. Orlando, Journal of Bridge Engineering, Vol.9, No. 1, pp. 35-42, "Structural Evaluation and Strengthening of a Reinforced Concrete Bridge".

6-P. C. Chang and S. C. Liu, Journal of Materials in Civil Engineering, 15(3): 298-304, "Recent research in nondestructive evaluation of civil infrastructures".

7-S. Beskhyroun, T. Oshimay and S. Mikamiy, Structural Control and Health Monitoring, Published Online: 29 Jan 2009, "Wavelet-based technique for structural damage detection".

8-K. Worden and J. Dulieu-Barton, Structural Health Monitoring, 3(1), 85-98 2004, "An overview of intelligent fault detection in systems and structures".

9-S.W. Doebling, C.L. Farrar and M.B. Prime, Shock and Vibration Digest, 30(2), 91-105, 1998, "A summery review of vibration-based damage identification methods".

10-R. Perera, and R. Torres, Journal of Structural Engineering, 132(9), 1491–1501, 2006, "Structural damage detection via modal data with genetic algorithms".

Archive of SID

www.SID.ir

11- A.M. Raich, and T.R. Liszkai, Journal of Structural Engineering, 133(3), 449–461, 2007, “Improving the performance of structural damage detection methods using advanced genetic algorithms”.
12- E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007, “Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition”.
13- R. Rajabioun, E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Lecture Notes in Computer Science, 5073 (2008) 680–695, “Colonial competitive algorithm as a tool for Nash equilibrium point achievement”.
14- E. Atashpaz-Gargari, F. Hashemzadeh, R. Rajabioun, C. Lucas, International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 1(3) (2008) 337–355, “Colonial competitive algorithm, a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process”.
۱۵–طاحونی،شاپور،" اجزای محدود برای تحلیل سازه‌ها"، انتشارات علم و ادب، تهران، ۱۳۷۸.

Archive of SID

www.SID.ir