

بررسی عملکرد الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ در ارزیابی آسیب سازه‌ها

میلاذ جهانگیری^۱، بهروز احمدی ندوشن^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

سازه‌ها برحسب نوع کاربرد در معرض انواع مختلف بارگذاری از قبیل باد، زلزله، انفجار و ... قرار می‌گیرند. از طرفی به‌منظور افزایش طول عمر مفید سازه می‌بایست شرایط بهره‌برداری مطلوبی فراهم گردد. در اثر بهره‌برداری نامناسب، افزایش بیش‌ازحد بارگذاری، تغییر در سختی سازه در اثر عیوب ماده و آسیب‌های ایجادشده، باعث می‌شود که سازه از شرایط طراحی خود دور شده و در حاشیه نایمن و خارج از طرح قرار گیرد. بنابراین ارزیابی به‌موقع آسیب جهت مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی برای افزایش طول عمر مفید سازه امری بسیار مهم تلقی می‌گردد. از این‌رو، در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از مفاهیم آنالیز ارتعاشات و روش اجزای محدود رویکردی نوین و قدرتمند جهت ارزیابی آسیب در سازه تبیین گردد. متعاقباً از روش الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ به‌منظور محاسبه و به‌گزینی موقعیت هندسی محل آسیب و شدت آسیب در سازه‌های تیر پیوسته فولادی و همچنین تیر یکسر گیردار استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی آسیب در تیر پیوسته فولادی نشان داد که روش پیشنهادشده در این پژوهش دارای قابلیت بسیار بالایی به‌منظور موقعیت‌یابی و تشخیص شدت آسیب در سناریو خسارت متعدد را دارد. بعلاوه، نتایج حاصل از این پژوهش برای تیر یکسر گیردار با نتایج مشابه آزمایشگاهی یانگ و هونگ مقایسه گردید. نتایج ارزیابی آسیب در تیر یکسر گیردار نشان داد که میزان خطای محاسباتی در روش ارائه‌شده کمتر از ۰/۰۶ بوده است، در حالیکه در نتایج مشابه آزمایشگاهی خطای محاسباتی ۰/۳ گزارش گردیده است. درنهایت، پس از بررسی‌ها و مطالعات انجام‌شده بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ به‌عنوان روشی توانمند و کاربردی جهت ارزیابی آسیب در سازه‌ها گزارش می‌گردد.

کلمات کلیدی: الگوریتم فراکاوشی، ارزیابی آسیب، روش اجزای محدود، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.83982.1164	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi:	10.22065/jsce.2017.83982.1164	۱۳۹۷/۱۰/۳۰	۱۳۹۶/۰۹/۰۷	۱۳۹۶/۰۹/۰۷	۱۳۹۶/۰۲/۲۳	۱۳۹۶/۰۲/۱۳
				* نویسنده مسئول:		بهروز احمدی ندوشن
				پست الکترونیکی:		behrooz.ahmadi@yazd.ac.ir

Performance Investigation of Metaheuristic Niche-Pareto Genetic Algorithm for Imperfection Assessment of Structures

Milad Jahangiri¹, Behrouz Ahmadi-Nedushan^{2*}

1- Postgraduate of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Associated Professor of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

ABSTRACT

Structures depending on the type of their application are subject to different types of loading, such as wind, earthquake and explosion loads. On the other hand, in order to increase the useful lifetime of the structures, optimal operating conditions must be provided. Inappropriate utilization, excessive loading, changes in structural stiffness due to the material imperfection will cause the structure to come out of its design conditions and leads to unsafe structure. Therefore, on time assessment of imperfection for retrofitting and rehabilitation in order to increase the useful lifetime of the structure is very important. This article presents a novel and robust approach for assessment of imperfections in the structure using the concepts of vibration analysis and finite element method. A multi-objective Niche-Pareto Genetic Algorithm was used for computation of geometric position and intensity of imperfection in a steel continuous beam structure as well as a cantilever beam. The results of the imperfection assessment in continuous steel beam demonstrate that the proposed method has great potential in localization and quantification of imperfection in the multi-stage scenario. In addition, the results of this study for cantilever beam were compared with the same experimental results reported in the literature. These results demonstrated that the computational error in the proposed method was less than 0.06, while the error of similar experimental results has been reported as 0.3. Finally, the results of this research, demonstrate that the metaheuristic Niche-Pareto Genetic Algorithm performs very well and therefore this algorithm is recommended as a robust and practical approach for imperfection assessment of structures

ARTICLE INFO

Received: 03/05/2017

Revised: 13/05/2017

Accepted: 28/09/2017

Keywords:

Metaheuristic Algorithm, Imperfection Assessment, Finite Element Method, Multi-objective, Optimization, Niche-Pareto Genetic Algorithm

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.83982.1164

*Corresponding author: Behrouz Ahmadi-Nedushan
Email address: behrooz.ahmadi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

در چند دهه گذشته، روش‌های شناسایی خسارت بر اساس روش مدل به‌روزرسانی، معمولاً به‌عنوان مسئله تک هدفه گسترش یافته است. با توجه به پیچیده بودن مسائل مهندسی و همچنین به دلیل عدم تابع تک هدفه معین جهت ارزیابی آسیب، به نظر می‌رسد که استفاده از توابع چندهدفه و همچنین بهینه‌سازی چندهدفه توانایی بسیار بالاتری جهت عیب‌یابی سیستم‌های سازه‌ای دارد. لیم روشی سیستماتیک پیشنهاد کرد که با اندازه‌گیری دقیق مودها در تمام درجات آزادی مدل اجزاء محدود، موقعیت و شدت آسیب را بطور دقیق ارزیابی می‌کند [۱]. صنایعی و همکاران فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی اندازه‌گیری شده را در یک زیرمجموعه‌ی انتخاب‌شده از درجات آزادی بکار برده‌اند تا پارامتر سختی و جرم را با الگوریتم تراکم تخمین بزنند [۲]. روش شناسایی خسارت بر پایه‌ی مودی توسط رن و دیراک پیشنهاد شد تا موقعیت و شدت خسارت را پیش‌بینی کند [۳]. خشنودیان و اسفندیاری نشان دادند که ضرب معادلات مقدار ویژه‌ی خسارت در مودهای آسیب‌دیده یا سالم، تعداد معادلات بیشتری نسبت به روش انرژی کرنشی برای تشخیص موقعیت خسارت، ایجاد می‌کند [۴]. چن و بیکانیک برای دستیابی به یک معادله‌ی حساسیت خطی از حساسیت پارامتر مودال نشان دادند که تغییر هر شکل مودی به‌صورت یک ترکیب خطی از بردارهای ویژه اصلی سازه‌ی سالم است. فاکتورهای شکل مودی تابعی از فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده از سازه‌ی آسیب‌دیده، انحراف ماتریس سختی و تغییر شکل مودی هستند. تعداد مجهولات برابر است با تعداد پارامترهای سازه‌ی به‌اضافه‌ی تعداد فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده ضرب در تعداد اشکال مودی که تعداد مجهولات مسائل بهینه‌سازی را افزایش می‌دهد [۵]. در بسیاری از روش‌های بهنگام سازی مدل مودال، بالاجبار تعداد معادلات کمتر از تعداد مجهولات است. بنابراین استفاده از انواع مختلف معادله‌ی حساسیت، با استفاده از همان داده‌های ورودی، باعث بهبود عملکرد الگوریتم بهنگام سازی مدل در برابر خطاهای اندازه‌گیری می‌شود [۶]. راه‌های مختلفی برای ارزیابی یکپارچگی سازه وجود دارد اما ایجاد روش‌های بازرسی که به‌طور سیستماتیک به ارزیابی یکپارچگی سازه می‌پردازد، ضروری است. روش بازرسی اصلی به دو بخش تست‌های غیر مخرب و مخرب تقسیم می‌شود. به‌طور خاص، روش‌های شناسایی بر اساس تست‌های غیر مخرب (NDT) با استفاده از سازه‌ی تحلیل‌شده، به دلیل جنبه‌های اجرایی و هزینه‌های پایین‌تر تست‌های مخرب ارجحیت دارند. برخی از روش‌ها، مبتنی بر خصوصیات دینامیکی سازه از قبیل فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی و میرایی سازه می‌باشند. مزیت این روش‌ها اندازه‌گیری دقیق پارامتر مودال می‌باشد. از سویی دیگر، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌عنوان گزینه‌ی امیدوارکننده برای حل مسائل دشوار شناسایی خسارت توسط فریزول و پنی مطرح‌شده است. مزیت بزرگ استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توانایی یافتن مینیمم مطلق در مسائل دشوار بهینه‌سازی است که در آن مینیمم‌های محلی زیادی در موقعیت خسارت رخ می‌دهد [۷]. کالی و آدامز از تغییر در فرکانس طبیعی همراه با مدل المان محدود برای یافتن خسارت استفاده نمودند [۸]. مسینا و همکاران یک رویکرد عدم قطعیت برای شناسایی شدت خسارت در موقعیت‌های مختلف را پیشنهاد کرد که بعدها آن را توسعه دادند و اعتبار داده‌ها را از طریق آزمون‌های عددی بدون نویز انجام دادند. با این حال، این روش برای سازه‌های بزرگ با تعداد درجات آزادی زیاد، مستلزم تلاش محاسباتی قابل توجهی است [۹]. ایتوریوز و همکاران از یک شاخص مجزا به نام شاخص اطمینان مودال مختصات COMAC استفاده کردند [۱۰]. در سال ۱۹۹۷ سالو روش شناسایی خسارت از طریق تغییر فرکانس را بررسی نمود. با وجود اینکه او از فرکانس‌های طبیعی به دلیل سریع و مقرون‌به‌صرفه بودن آنها برای شناسایی خسارت استفاده کرد اما در نهایت بدین نتیجه رسید که برای یافتن صحیح موقعیت و تعیین شدت خسارت، تنها استفاده از فرکانس کافی نیست و علاوه بر آن استفاده از اشکال مودی نیز لازم است [۱۱]. بسیاری از محققان مسئله‌ی شناسایی خسارت را با استفاده از شکل مودی و فرکانس بررسی نمودند. شی و همکاران در سال ۲۰۰۰ روشی مبتنی بر حساسیت را برای شناسایی موقعیت و میزان خسارت بررسی کردند. موقعیت خسارت با اشکال مودی و شدت آن با استفاده از فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری می‌شود [۱۲].

در این پژوهش قصد بر آن است که با مدل‌سازی تیر سرتاسری فولادی و تیر یکسر گیردار و با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ازدحام ذرات پارتو نیچ به ارزیابی آسیب پرداخته شود. در بخش بعدی روابط تئوری ارزیابی آسیب در سازه‌ها فرمول‌بندی گردیده است. متعاقباً معیارهای ارزیابی آسیب در سازه‌ها و الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ به تفصیل بیان شده و در پایان، نتایج حاصل از فرآیند الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ برای تیر سرتاسری فولادی بررسی گردید و همچنین برای تیر یکسر گیردار با نتایج مشابه آزمایشگاهی مقایسه و ارائه شده است.

۲- روابط تئوری ارزیابی آسیب در سازه‌ها

۲-۱- معادله ارتعاش حاکم

آسیب در سازه باعث تغییر در برخی پارامترهای مودال از قبیل فرکانس طبیعی، مقادیر میرایی و اشکال مودی می‌گردد. همچنین، خسارت وارد شده به سازه ممکن است باعث تغییر در دیگر پارامترهای سازه شامل ماتریس‌های جرم، میرایی، سختی و نرمی مودال سازه شود. معادله حرکت سازه با N درجه آزادی و ضرایب میرایی ویسکوز به شرح زیر بیان می‌گردد:

$$[M].\{\ddot{x}(t)\} + [D].\{\dot{x}(t)\} + [K].\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

در اینجا $[M]$ ، $[D]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی با مرتبه N می‌باشند. همچنین $\{x(t)\}$ ، $\{\dot{x}(t)\}$ و $\{\ddot{x}(t)\}$ به ترتیب مبین بردارهای جابجایی، سرعت و شتاب هستند و بردار $\{f(t)\}$ نیروی خارجی اعمال شده به سازه می‌باشد. با فرض یک ارتعاش هارمونیک، نیروی خارجی برابر $\{f(t)\} = \{f(\omega)\}.e^{i\omega t}$ و جابجایی برابر $\{x(t)\} = \{x(\omega)\}.e^{i\omega t}$ می‌باشند. اکنون با جایگذاری در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$(-\omega^2[M] + i\omega[D] + [K]).\{x(\omega)\}.e^{i\omega t} = \{f(\omega)\}.e^{i\omega t} \quad (2)$$

با فرض یک سیستم سازه‌ای ارتعاش آزاد نامیرا معادله فوق به فرم زیر بازنویسی می‌گردد:

$$(-\omega^2[M] + 0 + [K]).\{x(\omega)\} = 0 \quad (3)$$

با توجه بالاینکه جابجایی سیستم‌های سازه‌ای، ضربی از اشکال مودی است، معادله مذکور به فرم زیر بیان می‌گردد:

$$(-\omega^2[M] + [K]).\{\phi\} = 0 \quad (4)$$

نتایج حاصل از تحلیل مودال به کمک معادله مقدار ویژه شامل پارامترهای دینامیکی سازه از قبیل فرکانس طبیعی و شکل مودی سازه می‌گردد. معادله مقدار ویژه سازه در حالت کلی طبق رابطه (۶) بیان می‌گردد [۱۵]:

$$[Z] = [M]^{-1} \times [K] \quad (5)$$

$$([Z] - \lambda[I])\{\phi\} = 0 \quad (6)$$

در اینجا $[I]$ ماتریس واحد، λ مقادیر ویژه و $\{\phi\}$ بردار ویژه می‌باشند. معادله مقدار ویژه به منظور پایش سلامت سازه به دودسته تقسیم می‌گردد. دسته اول برای سازه سالم و دسته دوم برای سازه آسیب‌دیده بیان می‌گردد. در روابط (۷) و (۸) اندیس h معرف سازه سالم و اندیس d معرف سازه آسیب‌دیده می‌باشد [۱۳].

$$([Z]_i^h - \lambda_i^h[I])\{\phi_i^h\} = 0; i = 1, 2, 3, \dots, NM \quad (7)$$

$$([Z]_i^d - \lambda_i^d[I])\{\phi_i^d\} = 0; i = 1, 2, 3, \dots, NM \quad (8)$$

در اینجا $[Z]$ ماتریس سختی ویژه و NM تعداد مود مؤثر محاسباتی است.

۲-۲- ضریب تأثیر کاهندگی

سختی المان سازه بعد از اعمال خسارت دارای کاهش محسوس می‌باشد. این کاهش با ضریب ξ در ماتریس سختی المان اعمال می‌گردد. رابطه سختی کاهش یافته المان سازه به شرح ذیل می‌باشد [۱۴].

$$[K_{eq}^d] = (\xi). [K_{eq}^h]; \xi = 1 - \eta \quad (9)$$

$$\eta = 1 - \frac{(EI)_i^d}{(EI)_i^h} \quad (10)$$

در این رابطه $[K_{eq}^h]$ ، $[K_{eq}^d]$ ، ξ و η به ترتیب ماتریس سختی المان i ام در حالت‌های سازه سالم و آسیب‌دیده، ضریب ماتریس سختی المان سالم و ضریب تأثیر کاهش‌دهنده می‌باشند.

۲-۳- ضریب مشارکت جرمی

تعداد مودهای محاسباتی در تحلیل مودال سیستم سازه‌ای به تعداد درجات آزادی و متناسب با مدل اجزاء محدود سازه می‌باشد. در سیستم‌های پیچیده با تعداد درجات آزادی بالا حجم محاسباتی وسیع با عدم تغییر دقت زیاد رخ می‌دهد. بنابراین بر اساس آیین‌نامه تحلیل مودال می‌توان از تعداد مودهای کمتری که دارای دقت بالاتری هستند استفاده نمود. در صورتی که مجموع ضرایب مشارکت جرمی بیشتر از ۹۰٪ گردد، می‌توان تعداد تأثیر مودهای محاسباتی را کاهش داد. ضریب مشارکت جرمی بر اساس رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱۳]:

$$MP_i = P_i \times ([\phi]_i^T [M] [I]) / \left(\sum_{i=1}^{NM} M_i \right) \quad (11)$$

$$P_i = ([\phi]_i^T [M] [I]) / ([\phi]_i^T [M] [\phi]_i) \quad (12)$$

در اینجا MP_i ، P_i و $[I]$ به ترتیب ضریب مشارکت جرمی، ضریب مشارکت مودی و ماتریس مؤثر می‌باشد. تعداد مودهای محاسباتی برای تحلیل مودال در این پژوهش بر اساس مجموع ضرایب مشارکت جرمی بیشتر از ۹۰٪ در نظر گرفته شده است.

۳- معیارهای ارزیابی آسیب

معیار اول با استفاده از معیار اطمینان مودال و بر اساس سختی مودال تعریف شده است. از آنجاکه سختی سازه بعد از خسارت کاهش می‌یابد و جرم هم ثابت می‌باشد، بنابراین کاهش فرکانس طبیعی سازه یک امر بدیهی تلقی می‌گردد. ماتریس سختی مودال را جهت ارزیابی آسیب در سازه‌ها بر اساس عکس ماتریس نرمی بیان می‌گردد [۱۵ و ۱۶].

$$[K] = [F]^{-1} \quad (13)$$

$$[K]_i = [M] \cdot \{\Phi_i\} \cdot \lambda_i \cdot \{\Phi_i\}^T \cdot [M]; (i = 1, 2, 3, \dots, NM) \quad (14)$$

$$[K] = [K]_1 + [K]_2 + [K]_3 + \dots + [K]_{NM} \quad (15)$$

رابطه‌ی معیار اطمینان مودال بر اساس سختی به فرم زیر تبیین شده است:

$$MACSTIF_i = \frac{abs(\{K_{Num}\}_i^T \cdot \{K_{Exp}\}_i)^2}{(\{K_{Num}\}_i^T \cdot \{K_{Num}\}_i) \cdot (\{K_{Exp}\}_i^T \cdot \{K_{Exp}\}_i)} \quad (16)$$

در اینجا $\{K_{Num}\}_i$ و $\{K_{Exp}\}_i$ به ترتیب مبین بردار قطر اصلی ماتریس سختی عددی و آزمایشگاهی برای مود ارتعاش i ام می‌باشد. معیار اطمینان مودال مذکور ضریب همبستگی بردار سختی نام دارد. این معیار همبستگی همواره بین صفر و یک است که در حالت صفر به معنای عدم وجود همبستگی بین دو بردار می‌باشد و در حالت یک به معنای تطابق کامل بین دو بردار است. همچنین این معیار برای یک مود از سازه قابل کاربرد است در صورتی که در آنالیز دینامیکی بر اساس آیین‌نامه حداقل سه مود اول لازم می‌باشد. بنابراین، معیار اطمینان مودال بر اساس سختی به فرم زیر ارائه گردیده است [۱۶ و ۱۷]:

$$F_1 = 1 - \prod_{i=1}^{NM} MACSTIF_i \quad (17)$$

معیار دوم با استفاده از معیار اطمینان مودال و بر اساس اشکال مودی جهت ارزیابی آسیب بیان گردید. اشکال مودی سازه، معرف الگویی از تغییر شکل سازه در هر مود ارتعاش می‌باشد. معیار اطمینان مودال بر اساس شکل مودی سازه بر مبنای رابطه‌ی زیر تشریح می‌گردد:

$$MACPHI_i = \frac{abs(\{\Phi_{Num}\}_i^T \cdot \{\Phi_{Exp}\}_i)^2}{(\{\Phi_{Num}\}_i^T \cdot \{\Phi_{Num}\}_i) \times (\{\Phi_{Exp}\}_i^T \cdot \{\Phi_{Exp}\}_i)} \quad (18)$$

در اینجا $\{\Phi_{Num}\}_i$ و $\{\Phi_{Exp}\}_i$ به ترتیب مبین بردار شکل مودی عددی و آزمایشگاهی سازه برای مود ارتعاش i ام می باشد.

$$F_2 = 1 - \prod_{i=1}^{NM} MACPHI_i \quad (19)$$

۴- الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ

الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ در این پژوهش به منظور بهینه سازی مسئله چندهدفه ارزیابی آسیب به کار گرفته شده است. پیچیدگی در مسائل بهینه سازی چندهدفه و عدم وجود یک معیار ثابت جهت ارزیابی آسیب در سازه ها باعث گردید تا الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ به صورت چندهدفه در دستور کار قرار گیرد. الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ در ابتدا توسط هولاند به صورت مطلوبی گسترش یافت. این تکنیک بر اساس کدگذاری کروموزوم ها و تولید جمعیت تصادفی اولیه جهت زنده ماندن آن ها منجر به تقریب بهتر پاسخ نهایی می گردد. در هر نسل، یک دسته از تقریب داده ها به وسیله فرآیند انتخاب شخصی و تبادل اطلاعات تولید می گردد. این روند منجر به تکامل جمعیت و بهبود محیط هوش دسته جمعی می شود. تغییرات تدریجی کروموزوم ها ملزم به سه عملکرد تصادفی اصلی: انتخاب کردن، قطع کردن و جهش کردن به منظور ارتقاء دقت و تکامل در کروموزوم ها صورت می گیرد. در این پژوهش الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ که توسط هورن و همکاران پیشنهاد گردید برای حل مسئله بهینه سازی چندهدفه ارزیابی آسیب مورد استفاده قرار گرفت [۱۸]. ایده اصلی این الگوریتم بر مبنای رقابت بین دو کروموزوم و بر اساس فشار غالب (f_{dom}) می باشد. اگر یکی از آن دو غالب گردید، منجر به انتخاب کروموزوم دیگر می گردد. اگر هر دو کروموزوم غالب گرداند و یا غالب نشوند، نتیجه نهایی بر اساس اشتراک تفاضل تصمیم گیری می شود. در این روش حداقل تجربیات بدست آمده نیچ (σ_{share}) جهت بازتولید انتخاب می گردد. اندازه نیچ بر اساس شعاع نیچ (σ_{share}) تعیین می شود و تابع خطا (برازندگی) برای ذره (i) مورد طراحی بعد از اشتراک به شرح ذیل اصلاح می گردد [۱۸]:

$$f_{si} = f_i / \sum_{j=1}^M \phi(d_{ij}) \quad (20)$$

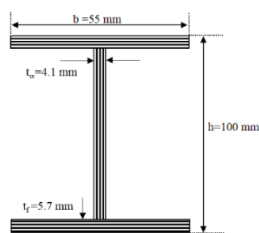
در اینجا M تعداد متغیرهای طراحی می باشد و تابع اشتراک گذاری به فرم ذیل فرمول بندی گردیده است:

$$\phi(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{share}}\right)^\alpha & ; d_{ij} < \sigma_{share} \\ 0 & ; d_{ij} \geq \sigma_{share} \end{cases} \quad (21)$$

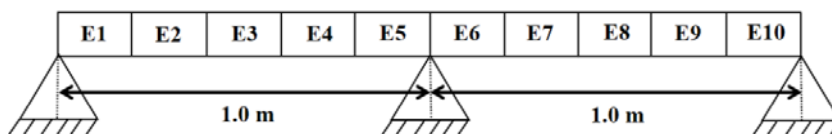
در اینجا d_{ij} فاصله مشخص کننده بین ذرات (i) و (j) می باشد.

۵- معرفی تیر سرتاسری فولادی

تیر سرتاسری فولادی با دو دهانه متقارن در نرم افزار مهندسی متلب مدل سازی گردید. تیر مورد بررسی از جنس فولاد و با سایز IPE 100 می باشد. مدول ارتجاعی مقطع $E = 2 \times 10^{11} \times N/m^2$ و چگالی مصالح $\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$ است. دو دهانه تیر پیوسته به صورت متقارن و به طول یک متر می باشد. این تیر پیوسته در هر دهانه به ۵ المان و مجموعاً در کل طول تیر به ۱۰ المان تیر برنولی- اولر تقسیم بندی شده است. ارتفاع مقطع تیر ۱۰۰ سانتی متر و طول بال تیر ۵۵ سانتی متر می باشد. همچنین ضخامت بال و جان مقطع عرضی تیر به ترتیب ۵/۷ و ۴/۱ میلی متر می باشد. همچنین ممان اینرسی مقطع $I = 1.71 \times 10^{-6} m^4$ در طراحی و مدل سازی در نظر گرفته شده است. تصویر شماتیک تیر سرتاسری مورد مطالعه و مقطع عرضی آن در اشکال ذیل ارائه شده است.

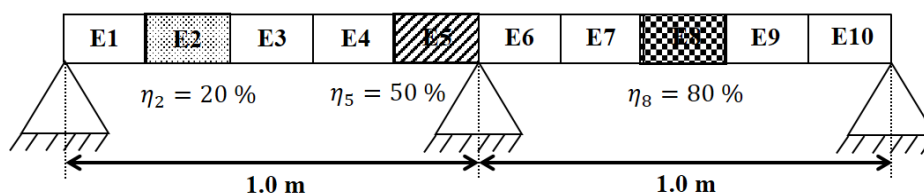


شکل ۲: مقطع عرضی تیر فولادی سرتاسری



شکل ۱: تیر فولادی سرتاسری

سناریو آسیب به صورت گسترده در المان‌های مختلف تعریف شده است. میزان شدت آسیب در المان‌ها در این سناریو بر اساس بارگذاری ثقیل و پتانسیل نیروهای خمشی و برشی در مقطع تیر بوده است. در این سناریو گسترده المان‌های E2، E5 و E8 به ترتیب به میزان ۲۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ مورد آسیب واقع گردیده‌اند. شکل شماتیک تیر سرتاسری مورد سناریو آسیب گسترده در اشکال ذیل ارائه گردیده است.



شکل ۳: تیر فولادی سرتاسری مورد سناریو آسیب گسترده

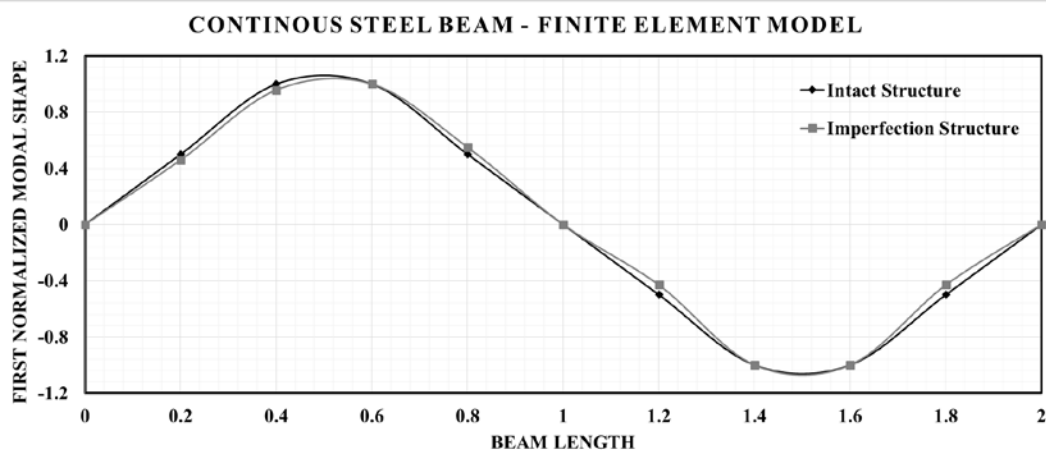
۵-۱- آنالیز مودال تیر سرتاسری

فرکانس‌های تیر پیوسته فولادی در دو حالت تیر سالم و تیر آسیب‌دیده محاسبه گردید. فرکانس‌های طبیعی سازه با سختی سازه رابطه مستقیم دارند. از این رو، سازه آسیب‌دیده دارای کاهش سختی است و لذا افت فرکانس‌های طبیعی سیستم انتظار می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس‌های طبیعی سیستم در حالت آسیب‌دیده افت محسوس‌تری نسبت به حالت اولیه دارد. این اختلاف در مدهای مراتب بالاتر بر حسب درصد محاسبه گردیده است (جدول ۱).

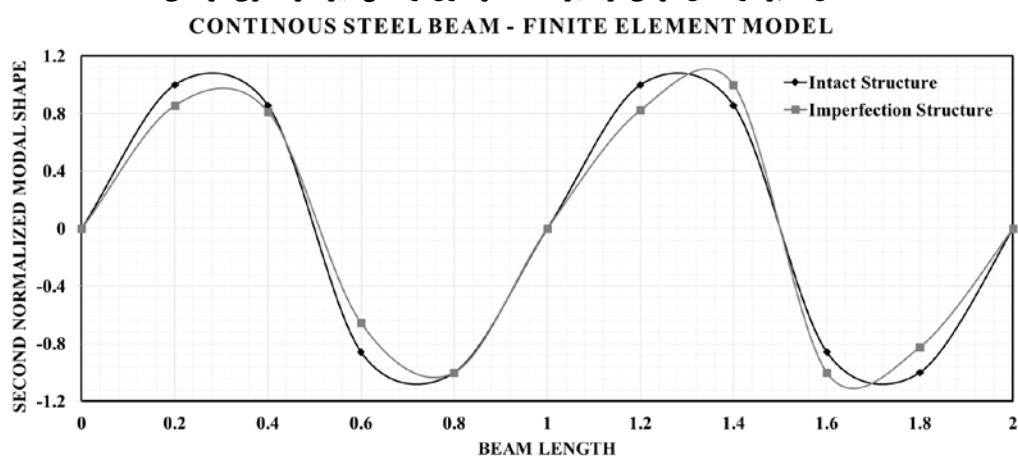
جدول ۱: مقادیر فرکانس تیر سرتاسری فولادی

شماره مود ارتعاش	تیر سرتاسری قبل از سناریو	تیر سرتاسری بعد از سناریو	اختلاف فرکانس (Δf) %
۱	۲۳۲/۴۵۳	۱۹۷/۱۳۸	۱۵ %
۲	۶۴۲/۹۷۰	۵۷۴/۰۰۱	۱۰ %
۳	۱۲۷۲/۸۴۱	۱۱۱۵/۱۳۷	۱۲ %

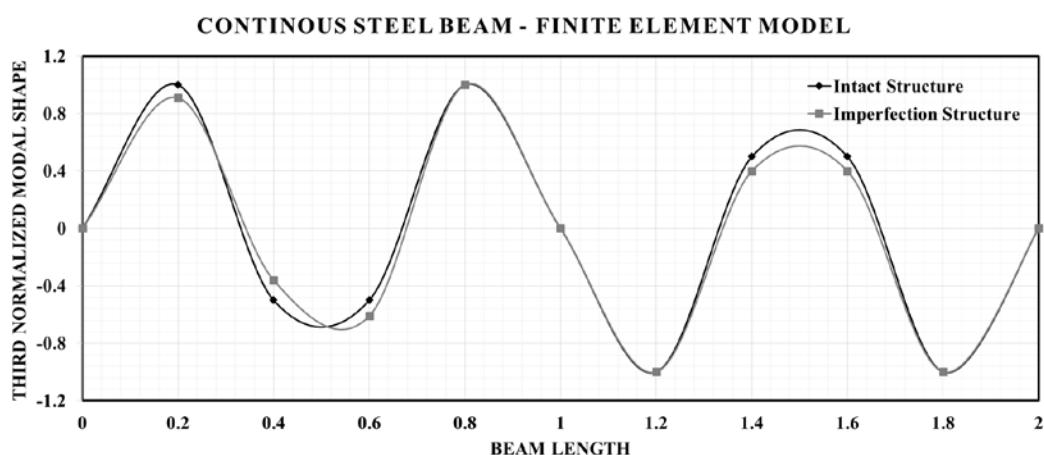
همچنین بردارهای شکل مودی نرمالیزه شده برای سه مود اول ارتعاش تیر در دو حالت تیر سالم و تیر آسیب‌دیده مقایسه گردید. بردارهای شکل مودی نسبت به موقعیت آسیب حساس می‌باشند، بنابراین بردارهای شکل مودی تیر نسبت به المان آسیب‌دیده در آن واکنش نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که شیب نمودارهای شکل مودی تیر در المان‌های آسیب‌دیده به صورت ناگهانی تغییر یافتند. المان‌های ۲، ۵ و ۸ در تصاویر شکل مودی نرمالیزه شده برای سه مود اول ارتعاش تیر مبین حساسیت معیار دوم نسبت به موقعیت هندسی آسیب می‌باشند (شکل ۴، ۵ و ۶).



شکل ۴: بردار شکل مودی نرمالیزه شده مود اول ارتعاش تیر سرتاسری فولادی



شکل ۵: بردار شکل مودی نرمالیزه شده مود دوم ارتعاش تیر سرتاسری فولادی

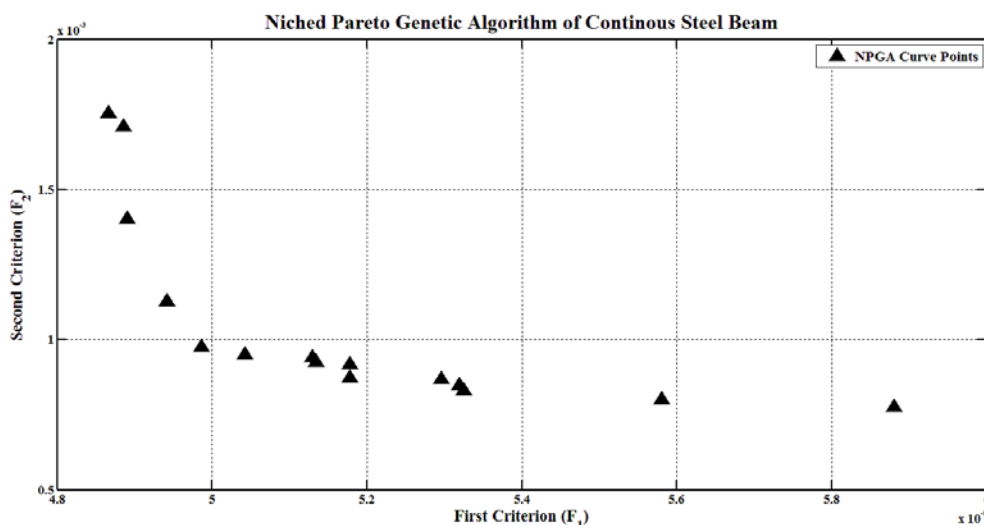


شکل ۶: بردار شکل مودی نرمالیزه شده مود سوم ارتعاش تیر سرتاسری فولادی

۵-۲- نتایج الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ بر تیر پیوسته فولادی

پس از مدل سازی تیر پیوسته فولادی و پیاده سازی الگوریتم بر روی آن، بهینه سازی چندمنظوره انجام گردید. در این پژوهش تعداد جمعیت اولیه هوش دسته جمعی برای تیر سرتاسری فولادی ۲۰۰ و تعداد گام های تکرار ۱۰۰ تعریف شد. سیستم مورد استفاده در این پژوهش از نوع پنتیوم Ci7 بوده و قدرت واحد پردازش مرکزی این سیستم ۱/۷۳ گیگاهرتز می باشد. از این رو، مدت زمان اجرای برنامه جهت ارزیابی

آسیب در تیر سرتاسری فولادی ۲۳۷۱/۶ ثانیه اندازه گیری گردید. نتیجه حاصل از این بهینه سازی چندهدفه منحنی جبهه پارتو زیر می باشد:



شکل ۷: منحنی جبهه پارتو نیچ برای تیر پیوسته فولادی

این منحنی جبهه پارتو دارای تعدادی نقطه بهینه می باشد که هر کدام از این نقاط دارای یک دسته جواب برای ضریب تأثیر کاهندگی تیر پیوسته فولادی است. اگرچه از نظر بهینه سازی تمام این نقاط در ناحیه قابل قبول می باشند و قیود برای همه آن ها رعایت شده است، اما از میان این مجموعه جواب می توان پاسخ دقیق را به کمک تابع حداقل مجموع مربعات (LSF) محاسبه نمود:

$$LSF = \left[\sum_{i=1}^{NE} (\eta_i^{EXP} - \eta_i^{NUM})^2 \right]^{0.5} \quad (22)$$

نقطه پاسخ بر اساس تابع حداقل مجموع مربعات به شرح جدول زیر مورد بررسی قرار گرفت:

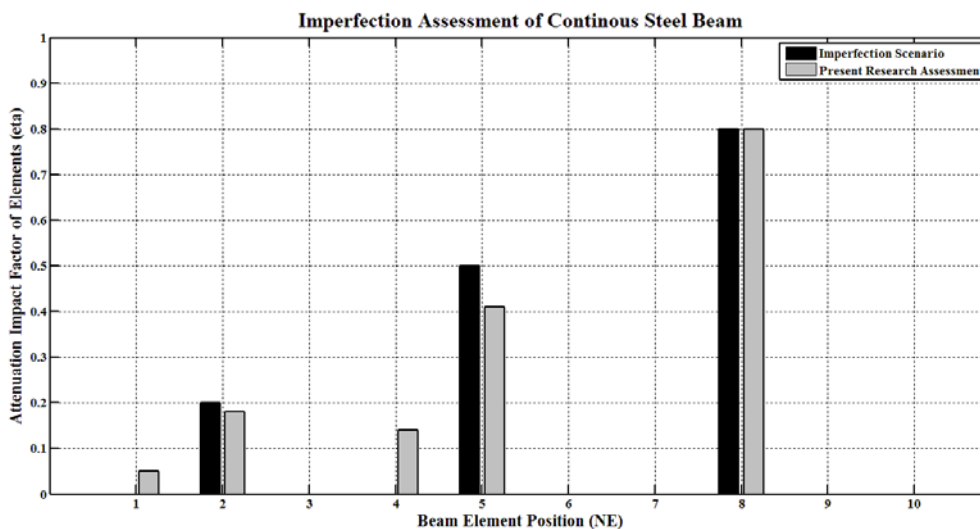
جدول ۲: داده های منحنی بهینه سازی الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ

ضریب تأثیر کاهندگی المان های سازه										خطا	معیارها	نقطه
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	۰/۰۹	$F_1 =$ 5.2E-05 $F_2 =$ 0.89E-03	۱
۰	۰	۰/۸	۰	۰	۰/۴۱	۰/۱۴	۰	۰/۱۸	۰/۰۵			

۵-۳- ارزیابی آسیب در تیر پیوسته فولادی

ارزیابی آسیب برای تیر پیوسته فولادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ انجام گردید. در این ارزیابی میزان خطای محاسباتی بر اساس تابع حداقل مجموع مربعات ضرایب تأثیر کاهندگی المان ها ۰/۰۹ بوده است و این امر مبین کارایی و توانایی روش پیشنهاد شده در این پژوهش می باشد. معیار اول بر اساس سختی مودی دارای مقدار $(5/2 \times 10^{-5})$ و معیار دوم بر اساس شکل مودی دارای مقدار $(10^{-3}) \times 0/89$ محاسبه شد. از طرف دیگر، میزان دقیق ضرایب تأثیر کاهندگی در المان های ۲، ۵ و ۷ به ترتیب معادل ۰/۱۸، ۰/۴۱ و ۰/۸ محاسبه گردید. المان شماره ۵ که در انتهای تکیه گاه ساده سمت راست دهانه اول تیر پیوسته می باشد، به دلیل مجاورت با تکیه گاه ساده و اشتراک گره این المان با تکیه گاه که در هنگام تشکیل ماتریس سختی خطای محاسباتی تولید می کند، بر المان های مجاور (المان شماره ۴)

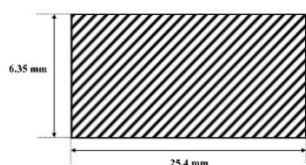
تأثیر نامطلوب می‌گذارد. بر اساس نمودار ارزیابی آسیب برای تیر سرتاسری فولادی می‌توان دقت بالا در ارزیابی آسیب را برای معیارهای ارائه‌شده همراه با الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش را گزارش نمود.



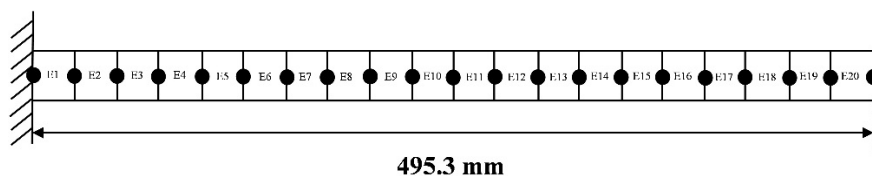
شکل ۸: ارزیابی آسیب در سرتاسری فولادی

۶- مدل سازی تیر یکسر گیردار

یانگ و هونگ با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ به مدل سازی آزمایشگاهی یک تیر یکسر گیردار به منظور ارزیابی آسیب در سازه پرداختند. مشخصات تیر یکسر گیردار مذکور به شرح: مدول ارتجاعی $E=7.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ، چگالی مصالح $\rho = 2210 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ است. طول تیر، عرض مقطع تیر و ارتفاع مقطع تیر یکسر گیردار به ترتیب برابر با $L=495.3 \text{ mm}$ ، $b=25.4 \text{ mm}$ و $h=6.35 \text{ mm}$ می‌باشد (شکل ۱ و ۲). تیر یکسر گیردار ذکر شده توسط یانگ و هونگ با استفاده از اره در المان شماره ۹ در آزمایشگاه بریده شده است. این تیر به ۲۰ المان یکسان برنولی-اولر تقسیم بندی گردید [۱۹ و ۲۰].

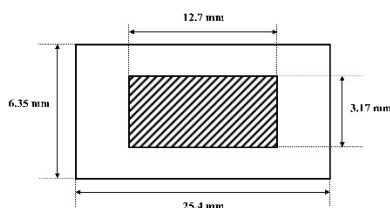


شکل ۱۰: مقطع عرضی تیر سالم

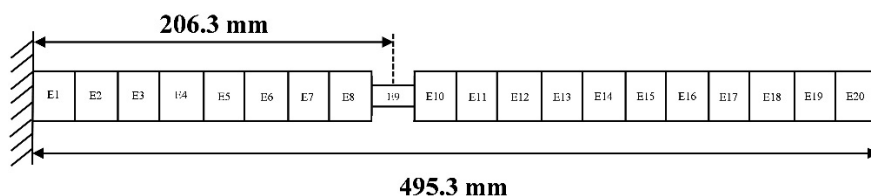


شکل ۹: تیر یکسر گیردار سالم

همچنین مدل تیر یکسر گیردار مورد مطالعه پس از اعمال آسیب به وسیله اره در فاصله $206.3/3$ میلی متری از تکیه گاه گیردار در عنصر شماره ۹ طبق شکل ۱۱ و ۱۲ ملاحظه می‌شود.



شکل ۱۲: مقطع عرضی تیر آسیب دیده



شکل ۱۱: تیر یکسر گیردار آسیب دیده

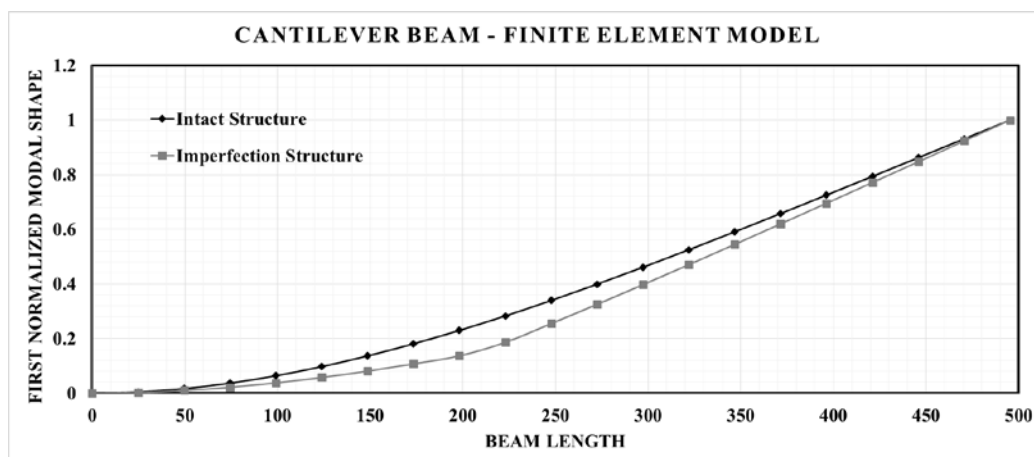
۶-۱- آنالیز مودال بر روی تیر یکسر گیردار

فرکانس‌های تیر یکسر گیردار در دو حالت تیر سالم و تیر آسیب‌دیده محاسبه گردید. فرکانس‌های طبیعی سازه با سختی سازه رابطه مستقیم دارند. از این رو، سازه آسیب‌دیده دارای کاهش سختی است و لذا افت فرکانس‌های طبیعی سیستم مورد انتظار است. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس‌های طبیعی سیستم در حالت آسیب‌دیده افت محسوس‌تری نسبت به حالت اولیه دارد. نتایج فرکانس‌های طبیعی تیر یکسر گیردار با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی یانگ و هونگ مقایسه شد که دارای تطابق مطلوبی در نتایج تحلیلی می‌باشد [۱۹ و ۲۰].

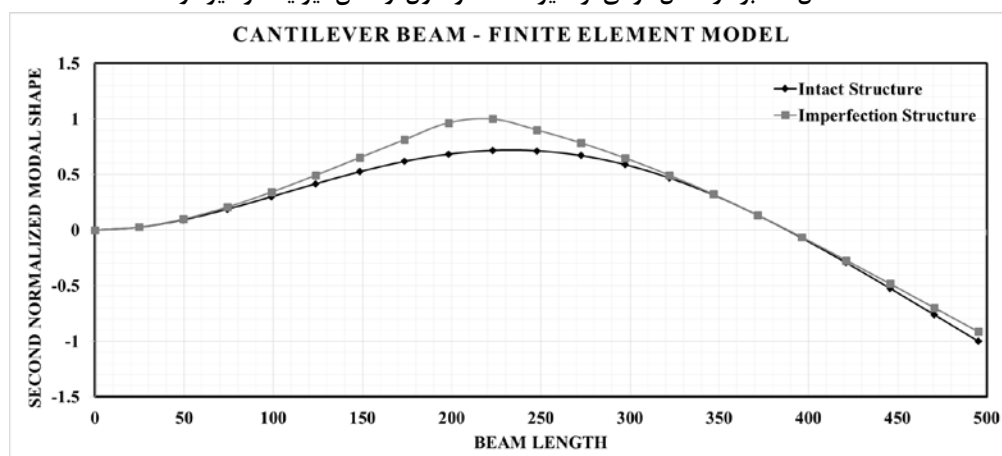
جدول ۳: مقادیر فرکانس تیر یکسر گیردار

مود	یانگ (تحلیلی)		یانگ (آزمایشگاهی)		پژوهش حاضر	
	آسیب	سالم	آسیب	سالم	آسیب	سالم
۱	۲۲/۷۱	۲۲/۰۹	۱۹	۱۹/۵۳	۲۳/۷	۱۸/۹۱
۲	۱۴۸/۵۹	۱۴۰/۹۰	۱۱۵/۵۸	۱۲۲/۰۵	۱۴۸/۵۲	۱۱۰/۸۸
۳	۴۱۶/۰۵	۴۰۷/۷۵	۳۳۲/۳۶	۳۳۹/۲۶	۴۱۵/۸۸	۳۸۵/۰۲

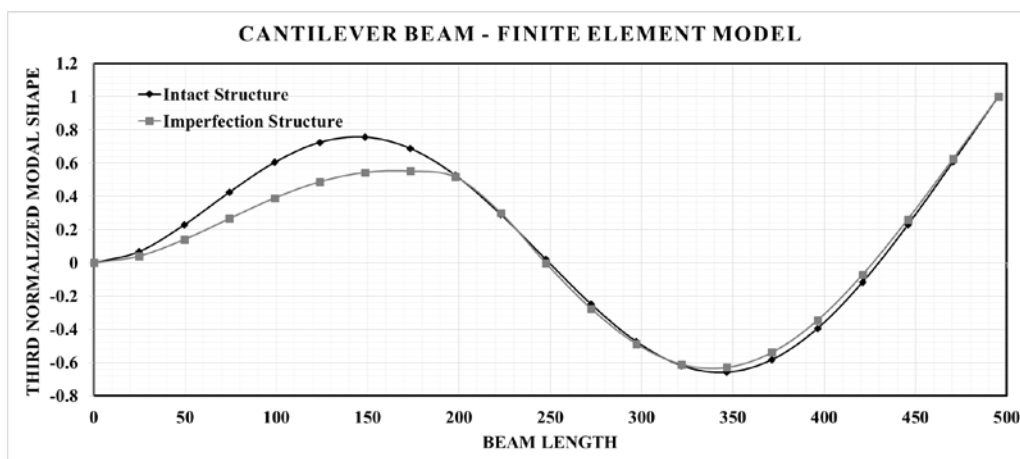
همچنین بردارهای شکل مودی نرمالیزه شده برای سه مود اول ارتعاش تیر در دو حالت تیر سالم و تیر آسیب‌دیده مقایسه گردید. بردارهای شکل مودی نسبت به موقعیت آسیب حساس می‌باشند، بنابراین بردارهای ویژه تیر نسبت به المان آسیب‌دیده در آن واکنش نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که شیب نمودارهای شکل مودی تیر در المان‌های آسیب‌دیده به صورت ناگهانی تغییر یافتند. در حالت آسیب‌دیده شیب نمودار شکل مودی در هر سه مود اول در عنصر شماره ۹ در طول ۲۰۶/۳ میلی‌متر از تکیه‌گاه گیردار تغییر یافت. شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب مودهای اول، دوم و سوم را نمایش می‌دهد:



شکل ۱۳: بردار شکل مودی نرمالیزه شده مود اول ارتعاش تیر یکسر گیردار



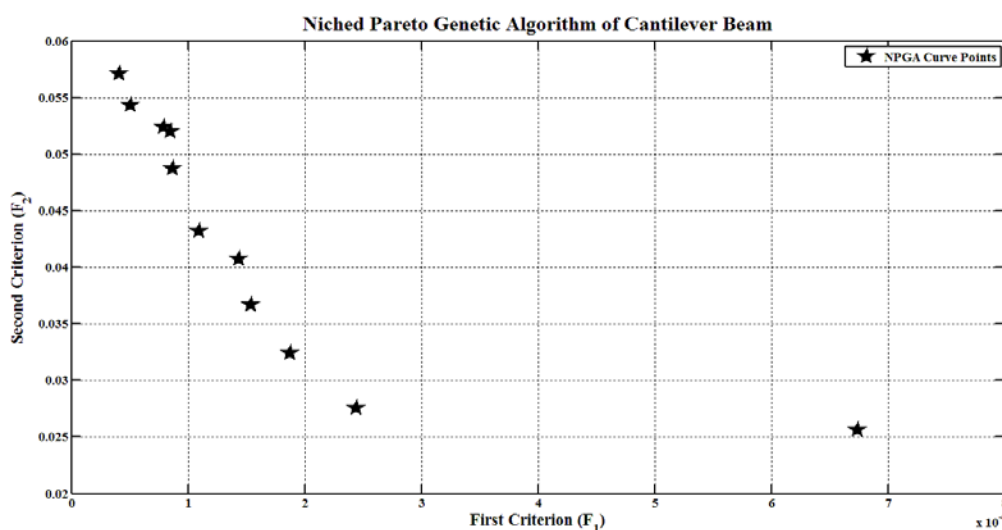
شکل ۱۴: بردار شکل مودی نرمالیزه شده مود دوم ارتعاش تیر یکسر گیردار



شکل ۱۵: بردار شکل مودی نرمالیزه شده مود سوم ارتعاش تیر یکسر گیردار

۲-۶- نتایج الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ

پس از مدل سازی تیر یکسر گیردار و پیاده سازی الگوریتم بر روی آن، بهینه سازی چندهدفه انجام گردید. در این پژوهش تعداد جمعیت اولیه هوش دسته جمعی برای تیر یکسر گیردار ۲۰۰ و تعداد گام های تکرار ۱۰۰ تعریف شد. سیستم مورد استفاده در این پژوهش از نوع پنتیوم Ci7 بوده و قدرت واحد پردازش مرکزی این سیستم ۱/۷۳ گیگاهرتز می باشد. از این رو، مدت زمان اجرای برنامه جهت ارزیابی آسیب در تیر کنسول ۱۲۷۳/۴ ثانیه اندازه گیری گردید. نتیجه حاصل از این بهینه سازی چندهدفه منحنی جبهه پارتو زیر می باشد:



شکل ۱۶: منحنی جبهه پارتو نیچ برای تیر کنسول

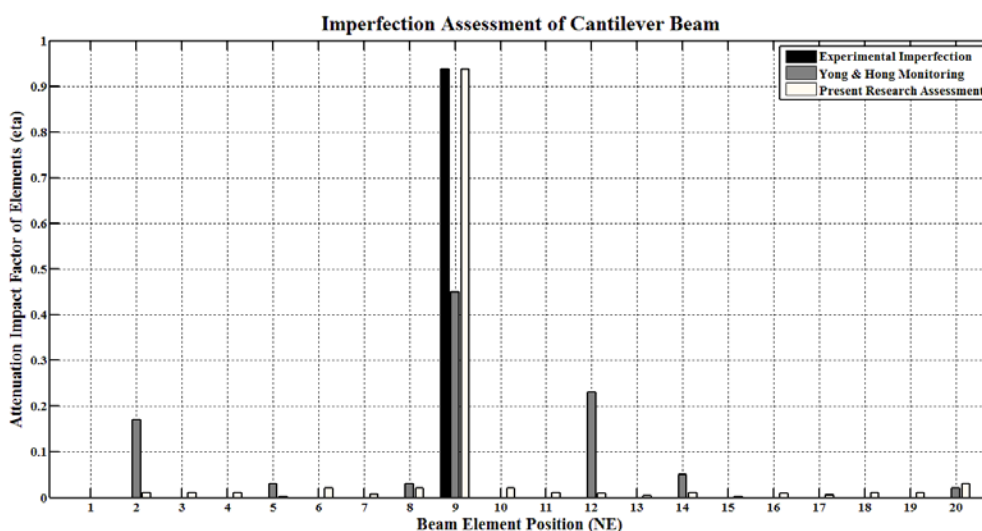
مجموعه جواب بهینه سازی شده حاصل از الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ که در منحنی جبهه پارتو تیر کنسول محاسبه گردیده است، برای هر کدام از نقاط پاسخ ها کنترل گردید. مقادیر معیارها، تابع حداقل مجموع مربعات و ضرایب تأثیر کاهش دگی برای هر کدام از نقاط منحنی جبهه پارتو در جدول زیر ارائه شده است. از بین تمامی نقاط قابل قبول منحنی جبهه پارتو نقطه شماره ۸ که با علامت * مشخص گردیده است دارای کمینه خطای محاسباتی می باشد.

جدول ۴: داده‌های منحنی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ

ضریب تأثیر کاهندگی المان‌های سازه										خطا	معیارها	نقاط
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.096	$F_1 =$ 4.09E-05	۱
0.01	0.9384	0.01	0.009	0.02	0.01	0.005	0.008	0.01	0.008			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.100	$F_2 =$ 6.74 E-04	۲
0.07	0.004	0.01	0.008	0.01	0.003	0.01	0.01	0.01	0.009			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.091	$F_1 =$ 2.44 E-04	۳
0	0.9362	0.02	0.007	0.001	0	0	0.008	0.01	0			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.094	$F_2 =$ 0.025	۴
0.08	0	0.001	0.01	0.01	0.003	0	0.01	0.03	0.01			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.091	$F_1 =$ 2.44 E-04	۳
0.006	0.9373	0.03	0.01	0	0.009	0.002	0	0.01	0.008			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.094	$F_2 =$ 0.027	۵
0.07	0.01	0	0.01	0.006	0.001	0.007	0.002	0.003	0.006			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.094	$F_1 =$ 1.87 E-04	۴
0.01	0.9372	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0.009	0			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.094	$F_2 =$ 0.032	۵
0.07	0	0.001	0.01	0.01	0.003	0.01	0.004	0.02	0.003			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.094	$F_1 =$ 1.09 E-04	۵
0.02	0.9377	0.03	0.003	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.001			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.096	$F_2 =$ 0.043	۶
0.07	0.008	0.006	0.006	0.01	0.004	0.01	0.003	0.01	0.01			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.096	$F_1 =$ 1.53 E-04	۶
0.006	0.9374	0.03	0.01	0.02	0.01	0.007	0.004	0.01	0.008			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.093	$F_2 =$ 0.036	۷
0.08	0.01	0.01	0.007	0.008	0.001	0.008	0.003	0.003	0.006			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.093	$F_1 =$ 8.76 E-05	۷
0.02	0.9377	0.005	0.008	0.01	0.01	0.02	0.01	0.009	0.001			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.067	$F_2 =$ 0.048	۸*
0.07	0.008	0.009	0.008	0.009	0.004	0.01	0.009	0.02	0.003			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.067	$F_1 =$ 1.43 E-04	۸*
0.02	0.9373	0.02	0.008	0.02	0.002	0.01	0.01	0.01	0			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.093	$F_2 =$ 0.040	۹
0.03	0.01	0.01	0.005	0.009	0.002	0.01	0.004	0.009	0.01			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.093	$F_1 =$ 5.08 E-05	۹
0.01	0.9379	0.02	0.007	0.02	0.01	0.008	0.008	0.01	0.009			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.110	$F_2 =$ 0.054	۱۰
0.07	0.004	0.01	0.006	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.110	$F_1 =$ 8.46 E-05	۱۰
0.01	0.9378	0.02	0.003	0.02	0.01	0.01	0.006	0.009	0.007			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.080	$F_2 =$ 0.052	۱۱
0.09	0.004	0.01	0.009	0.006	0	0.01	0.01	0.008	0.01			
η_{10}	η_9	η_8	η_7	η_6	η_5	η_4	η_3	η_2	η_1	0.080	$F_1 =$ 7.88 E-05	۱۱
0.02	0.9379	0.03	0.005	0.01	0.002	0.01	0.01	0.005	0.008			
η_{20}	η_{19}	η_{18}	η_{17}	η_{16}	η_{15}	η_{14}	η_{13}	η_{12}	η_{11}	0.080	$F_2 =$ 0.052	۱۱
0.05	0.01	0.01	0.008	0.01	0.003	0.01	0.01	0.01	0.01			

۳-۶- ارزیابی آسیب در تیر یکسر گیردار

با استفاده از نمودار بهینه جبهه پارتو به ارزیابی آسیب در تیر یکسر گیردار پرداخته شد. نقطه شماره ۸ از جدول ۴ با استفاده از تابع حداقل مجموع مربعات ضرایب تأثیر کاهندگی به عنوان نقطه پاسخ نهایی از مجموعه جواب بهینه‌سازی چندهدفه انتخاب گردید. اطلاعات ضرایب تأثیر کاهندگی برای المان‌های ۱ تا ۲۰ در نمودار ارزیابی آسیب در کنار نتایج یانگ و هونگ ترسیم گردیده است. موقعیت و دقت آسیب در المان بریده شده توسط اره (المان شماره ۹) با کیفیت بسیار مناسبی ارزیابی شده است. محور افقی نمودار ارزیابی آسیب نشان‌دهنده‌ی شماره المان می‌باشد و محور قائم نمودار بیانگر میزان ضریب تأثیر کاهندگی در هر المان می‌باشد. نمودار ارزیابی آسیب در تیر یکسر گیردار به شرح ذیل در مقایسه با نتایج مشابه آزمایشگاهی به دست آمد:



شکل ۱۷: ارزیابی آسیب در تیر یکسر گیردار

ارزیابی آسیب در تیر یکسر گیردار در سه حالت آسیب اعمال شده آزمایشگاهی، نتایج یانگ و هونگ و در نهایت تحقیق حاضر مقایسه و ارائه گردیده است. معیار اول بر اساس سختی مودی برای تحقیق حاضر دارای مقدار $(1/43 \times 10^{-4})$ و معیار دوم بر اساس شکل مودی دارای مقدار (4×10^{-2}) محاسبه شد. مجموع خطای حداقل مربعات ضرایب تأثیر المان‌ها در پژوهش یانگ و هونگ حدود $0/3355$ و میزان خطای محاسباتی در این پژوهش $0/067$ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهاد شده در این پژوهش دارای دقت بسیار بالایی جهت ارزیابی آسیب در سازه می‌باشد. میزان ضریب تأثیر کاهندگی برای المان بریده شده توسط اره (المان شماره ۹) در روش یانگ و هونگ حدود $0/44$ و مقدار ضریب تأثیر کاهندگی با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه سختی مودال و شکل مودال با استفاده از الگوریتم فراکاشی ژنتیک پارتو نیچ معادل $0/9373$ محاسبه شده است، در حالی که میزان دقیق این ضریب در المان بریده شده به وسیله اره با محاسبه مقدار دقیق ضریب کاهندگی در رابطه شماره (۱۰) معادل $0/9377$ بود. در مابقی المان‌های سالم جمع میزان خطای محاسباتی به صورت مجموع مستقیم مقادیر ضرایب کاهندگی المان‌ها در روش ارائه شده کمتر از $0/2$ می‌باشد و همین مقدار به صورت مشابه در تحقیق یانگ و هونگ معادل $0/6$ ارزیابی می‌گردد. بنابراین کاربرد الگوریتم فراکاشی ژنتیک پارتو نیچ به منظور ارزیابی آسیب در سازه‌ها بسیار توانمند است و کاربرد آن در حوزه آسیب‌شناسی سازه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

۷- نتیجه گیری

۱- نتایج حاصل از تحلیل مودال با استفاده از معادله مقدار ویژه سازه در حالت آسیب دیده نشان داد که فرکانس‌های طبیعی سازه و اشکال مودی طبیعی سازه از جمله پارامترهای مهم در فرآیند الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ می‌باشند. بنابراین فرکانس‌های طبیعی به‌عنوان پارامتر حساس نسبت به شدت آسیب و بردارهای شکل مودی طبیعی به‌عنوان پارامتر حساس نسبت به موقعیت آسیب به‌منظور ارزیابی سلامت در سازه‌ها محسوب می‌گردند.

۲- تابع هدف اول بر اساس فرکانس‌های طبیعی سازه در دو حالت عددی و آزمایشگاهی فرمول‌بندی گردیده است که خاصیت ارزیابی شدت آسیب را در محتوای تابع هدف سختی مودی دارد. تابع هدف دوم بر اساس شکل مودی طبیعی سازه در دو حالت عددی و آزمایشگاهی بوده است که ویژگی حساسیت به موقعیت آسیب را در محتوای تابع هدف شکل مودی دارا می‌باشد. توابع سختی مودال و شکل مودال در این پژوهش به‌عنوان یک مجموعه چندهدفه قدرتمند جهت ارزیابی آسیب در سازه‌ها گزارش می‌گردد.

۳- مدت‌زمان اجرای برنامه با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ برای تیر پیوسته فولادی و تیر کنسول به ترتیب ۲۳۴۷ و ۱۲۸۳ ثانیه بوده است که با توجه به همگرایی منحنی جبهه پارتو برای هر دو تابع هدف و دقت در پاسخ ارزیابی آسیب در سازه‌ها به‌عنوان ابزاری توانمند تلقی می‌گردد. الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ دارای سرعت همگرایی مطلوبی بوده است. بنابراین، عملکرد این الگوریتم به‌منظور ارزیابی آسیب در سازه‌ها مطلوب ارزیابی می‌گردد.

۴- میزان خطای محاسباتی با استفاده از تابع اختلاف مجموع مربعات ضرایب تأثیر کاهندگی در دو حالت عددی و آزمایشگاهی برای تیر پیوسته فولادی معادل با ۰/۰۹ و در تیر یکسر گیردار برابر با ۰/۰۶ به‌دست آمده است. درحالی‌که میزان خطای محاسباتی در روش آزمایشگاهی ۰/۳۰ گزارش گردیده است. بنابراین میزان خطای محاسباتی با استفاده از تابع اختلاف مجموع مربعات ضرایب تأثیر کاهندگی برای الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتو نیچ در هر دو سازه تیر پیوسته فولادی و تیر یکسر گیردار مورد بررسی کمتر از ۰/۱ می‌باشد.

۵- بر اساس مطالعه نتایج حاصل از نمودار ارزیابی آسیب برای تیر پیوسته فولادی و همچنین بر اساس مقایسه نتایج حاصل از نمودار ارزیابی آسیب برای تیر یکسر گیردار با نتایج مشابه آزمایشگاهی به نظر می‌رسد که ارزیابی آسیب در تیرها با استفاده از فرآیند الگوریتم ژنتیک پارتو نیچ نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. بنابراین، روش مذکور به‌عنوان یک روش کارآمد و غیر مخرب جهت ارزیابی آسیب در سازه تلقی می‌گردد.

مراجع:

- [1] Lim, T.W. and Kashangaki, T.A.L. (1994). Structural Damage Detection of Space Truss Structures Using Best Achievable Eigenvectors. *AIAA Journal*, 32(5).
- [2] Sanayei, M., McClain, J.A.S., Wadia-Fascetti, S. and Santini, E.M. (1999). Parameter estimation incorporating modal data and boundary conditions. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 125(9), 1048-1055.
- [3] Ren, W.X. and De Roeck, G. (2001). Structural damage identification using modal data. I: simulation verification. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 128, 87-95.
- [4] Khoshnoudiana, F. and Esfandiari, A. (2011). Structural damage diagnosis using modal data. *Scientia Iranica*, 18(4), 853-860.
- [5] Chen, H.P. and Bicanic, N. (2000). Assessment of damage in continuum Structures based on incomplete modal information. *Computers and structures*, 74, 559-570.
- [6] Hassiotis, S. (2000). Identification of damage using natural frequencies and Markov parameters. *Computers and structures*, 74, 365-373.
- [7] Penny, J. E. T., D. A. L. (1993), Wilson, and M. I. Friswell, Damage location in structures using vibration data. in Proc. of the 11th International Modal Analysis Conference, 861-867.
- [8] Cawley, P. and Adams, R.D. (1979). The locations of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Strain Analysis*, 14(2), 49-57.
- [9] Messina, A., Williams, E.J. and Contursi, T., (1998), Structural Damage Detection By A Sensitivity and Statistical-Based Method, *Journal of Sound and Vibration*, 216(5), 791-808.
- [10] Iturrioz, I., Pasquetti, E., Doz, G. (1999). Evaluation of structural damage through changes in dynamic properties. *International Symposium on nondestructive testing contribution to the infrastructure safety system in the 21st century*, 162-166.

- [11] Salawu, O.S. (1997). Detection of Structural Damage through Change in Frequency: a review. *Journal of Engineering Structures*, 19(9), 718-723.
- [12] Shi, Z., Law, S., Zhang, L. (2000). Damage localization by directly using incomplete mode shapes. *Engineering Mechanics*, 126(6), 656-660.
- [13] Humar, L. (2002). *Dynamics of Structures*, Second Edition, Carleton University, Ottawa, Canada.
- [14] Perera, R., Ruiz, A., Manzano, C. (2008). Performance assessment of multi-criteria damage identification genetic algorithms. *Computers and Structures*, 87, 120–127.
- [15] Jahangiri, M., Ahmadi, B., Rahimi, H.A. (2015). Application of Single-Objective Optimization Techniques for Structural Health Monitoring. 2nd International & 6th National Conference on Earthquake & Structures, At ACECR of Kerman, Kerman, Iran.
- [16] Perera, R. and Fang, S.E. (2010). Damage identification by response surface based model updating using D-optimal design. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, 717–733.
- [17] Jahangiri, M., Ahmadi, B., Rahimi, H.A. (2015). Structural Damage Localization and Quantification Based on Multi-Objective Optimization Method. 2nd International & 6th National Conference on Earthquake & Structures, At ACECR of Kerman, Kerman, Iran.
- [18] Horn J, Nafpliotis N, Goldberg DE. (1994). A Niche Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In: *Proceedings of the 1st IEEE conference on computation evolutionary*, 1, 82–7.
- [19] Yong, X., and Hong, H. (2001). A genetic algorithm for structural damage detection based on vibration data. *Proc. 19th International Modal Analysis Conference*.
- [20] Hassiotis, S. and Jeon, G.D. (1995). Identification of stiffness reduction using natural frequencies. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 121(10).