

مروری بر روش های شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای مودال

احسان جمشیدی^{۱*}، بهرام جمشیدی^۲، فاطمه تقی خاکی^۲، علیرضا ارغوان^۳

۱- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 ۳- مربی، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 * سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۴۵-۱۷۹، ehsan.jamshidi@semnan.ac.ir

چکیده

یکی از روش های متداول شناسایی آسیب در سازه ها و تعیین محل و شدت آسیب در آنها بررسی تغییرات پارامترهای مودال سازه قبل و بعد از بروز آسیب است. در این روند که اغلب بر پایه روش های بهینه سازی هستند، یک تابع هدف بر پایه فرکانس های طبیعی و یا شکل مدهای سازه و یا هر دو به کار برده می شود. در این مقاله سعی می شود مروری اجمالی بر تحقیقات پیشین در خصوص شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای مودال و توابع هدف متداول در مرحله بهینه سازی در فرایند شناسایی آسیب انجام گیرد. به این منظور، روش های شناسایی آسیب بر اساس فرکانس طبیعی، شکل مود، انحنای شکل مود و هر دو، شکل مود و فرکانس طبیعی مرور می شوند. در ادامه با توجه به اهمیت بالای توابع هدف در فرایند شناسایی آسیب، توابع هدف بر پایه معیار اطمینان مودال، ماتریس انعطاف پذیری و فرکانس های طبیعی و شکل های مود مقایسه می شوند.

کلیدواژگان

شناسایی آسیب، پارامترهای مودال، تابع هدف، فرکانس طبیعی، شکل مود، ماتریس انعطاف پذیری، انحنای شکل مود

Review of damage detection methods based on modal parameters

Ehsan Jamshidi^{1*}, Bahram Jamshidi², Fatemeh Taghi Khaki², Alireza Arghavan³

1- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
 2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
 3- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
 * P.O.B. 35145-179, Semnan, Iran, ehsan.jamshidi@semnan.ac.ir

Abstract

One of the common methods of structural damage detections and identification of location and severity of the damage in structures is investigation of changes in modal parameters before and after damage. These methods which are mostly based on optimization techniques use an objective function based on natural frequencies and mode shapes. This paper reviews previous researches in damage detection techniques based on modal parameters and common objective functions used in the optimization stage in the damage detection process. To this end, damage detection methods based on natural frequency, mode shape, curvature mode shape and both of mode shape and natural frequency are reviewed. In the following, due to high importance of objective function in the damage detection process, objective functions based on modal assurance criterion, flexibility matrix and natural frequency and mode shapes are compared.

Keywords

Damage detection, Modal Parameters, Objective Function, Natural Frequency, Mode Shape, Flexibility Matrix, Curvature Mode Shape

گسترده ای برای شناسایی آسیب محسوب می شود. عموماً روش های شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای ارتعاشی در چهار دسته اصلی به شرح زیر طبقه بندی می شوند.

۱-۲ روش های شناسایی آسیب بر اساس فرکانس طبیعی

آسیب یابی سازه بر اساس تغییرات فرکانس طبیعی آن، قدیمی ترین و معروفترین روش برآورد خرابی می باشد. باید دانست، این ویژگی بیشترین کاربرد را برای تخمین خسارت در گذشته و حال حاضر دارد. این راهکارها دارای مزایا و کاستی هایی نیز می باشد. فریس ول و سینه [۲] برای بهبود این شیوه، روش ترک تاوانی را در ترک یابی تیرها به کار گرفتند. ریزوس و همکارانش [۳] ترک را به عنوان یک فنر پیچشی^۱ در آنالیز مودال تیر یکسرگیردار با سطح مقطع مستطیل (شکل ۱) معرفی کرده اند.

۱- مقدمه

به دلیل تغییر رفتار دینامیکی سازه های دارای ترک نسبت به شرایط اولیه و سالم روش یافتن ترک در سازه بر اساس پاسخ های دینامیکی آن ها قبل و بعد از بوجود آمدن خسارت، از گذشته مورد توجه و بررسی قرار داشته است. در سالهای اخیر با توسعه و گسترش تکنیک های پردازش سیگنال و الگوریتم های بهینه سازی راهکارهای جدیدتر و کاربردی تری در این حوزه ارائه شده است بر اثر ایجاد خسارت در یک سازه پارامترهای مودال (فرکانس طبیعی، شکل مودها و ضرایب میرایی) دستخوش تغییر می گردند. در این مقاله سعی می شود مروری اجمالی بر تحقیقات پیشین در خصوص شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای مودال و توابع هدف متداول در مرحله بهینه سازی در فرایند شناسایی آسیب انجام گیرد.

۲- روش های شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای ارتعاشی

اولین بار حساسیت پارامترهای ارتعاشی برای آسیب در سازه توسط دولوف و ژوا [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای ارتعاشی ابزار

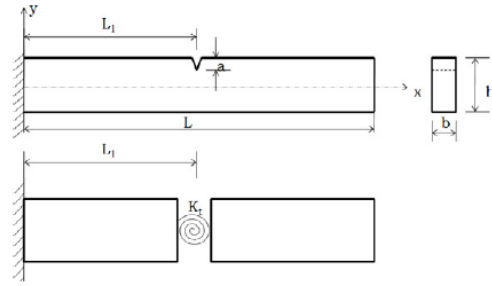
¹ Rotational spring

ترک بر روی فرکانس طبیعی را بررسی کرده است و ملاحظه شده که نسبت عمق بزرگتر ترک نسبت به عمق کوچکتر ترک اثر بیشتری بر روی فرکانس طبیعی دارد. نارسایی مهم بهره‌جویی از تغییرات فرکانس‌ها حساسیت کم آن‌هاست. بر این اساس باید اندازه‌گیری‌ها دقیق و آسیب دیدگی شدید باشد تا تخمین خسارت به درستی انجام گیرد. مایتی و لیله [۹] با استفاده از نمودار کانتور و فرکانس طبیعی به تعیین محل و اندازه ترک در تیر مبتنی بر تئوری تیر تیموشنکو^۳ پرداختند و نیز همچنین شناسایی ترک در قاب هواپیما را طبق روش فوق مورد بررسی قرار داده‌اند. لی [۱۰] روشی ساده برای شناسایی آسیب در سازه بر اساس تغییرات فرکانس طبیعی ارائه داد که بر این اساس فنر پیچشی به جای ترک مدل شده است. او روش المان محدود و روش نیوتن-رافسون برای شناسایی ترک‌های متعدد در تیر به کار گرفت، که برای تیر با n ترک به $2n$ فرکانس طبیعی نیاز است. لازم به ذکر است که مزیت مهم این روش آن است که تعیین فرکانس‌های طبیعی به آسانی امکانپذیر است. در واقع با گذاشتن یک حسگر در سازه می‌توان فرکانس‌های گوناگون آن را اندازه‌گیری کرد. باید افزود فرکانس‌های طبیعی به تمامی گونه‌های آسیب محلی و کلی حساس می‌باشد.

۲-۲- روش شناسایی آسیب بر اساس شکل مود

از دیگر مشخصه‌های دینامیکی سازه‌ها، شکل مودها می‌باشد که در ارزیابی آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری شکل مود دشوارتر از سنجش فرکانس‌های طبیعی است. شکل مود ویژگی یگانه هر سازه است. در عمل امکان اندازه‌گیری مودها برای تمام درجه‌های آزادی وجود ندارد. بنابراین یکی از مشکلات دیگر استفاده از مودها این است که چگونگی شکل‌های مود تجربی و تحلیلی را به هم وابسته سازد. برای رفع این مشکل پژوهش‌هایی توسط دیروک [۱۱] صورت گرفته است. ماوسن و همکارانش [۱۲] از سایر محققینی هستند که برای شناسایی ترک مبتنی بر شکل مود تلاش‌هایی انجام داده‌اند و آن‌ها با توجه به رابطه ذاتی شکل مود^۴ و جایجایی استاتیکی^۵ برای حساس تر شدن پارامتر شکل مود به آسیب، استفاده همزمان دو تکنیک شکل مود و جایجایی استاتیکی را پیشنهاد کرده‌اند.

روش توسعه یافته دیگری اخیراً بر اساس تغییرات در اولین دامنه انحراف شکل مود (CFMSS)^۶ در یک ساختمان توسط ژو و کاو [۱۳] مورد بحث قرار گرفته است. آن‌ها در تحقیق خود الگوریتمی تکراری برای شناسایی محل و میزان ترک از طریق پارامترهای مودال به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری اولین شکل مود سازه استفاده کرده‌اند. این روش در چهار مرحله اجرا می‌شود، ابتدا تحلیل حساسیت پارامترهای مودال و مشتقات آن‌ها صورت گرفته است و سپس فرضیه‌ای که مقدار CFMSS در طبقه آسیب دیده ساختمان (در حالت تک آسیب) بزرگتر از صفر است به اثبات رسیده و در مرحله بعد یک الگوریتم تکراری برای تعیین محل آسیب توسعه یافته است. و در نهایت میزان آسیب تعیین شده با استفاده از مقدار CFMSS بهبود یافته است. آن‌ها نتیجه گرفتند که روش ارائه شده نسبت به روش‌های دیگر دارای مزایایی است. زیرا استفاده از پارامترهای مودال شکل مود اول در مقایسه با پارامترهای مودال مرتبه بالا خطای کمتر و دقت بیشتری دارند و از طرفی به آسانی به دست می‌آیند.



شکل ۱ تیر یکسر گیر دار با یک ترک و جایگزینی ترک به وسیله فنر پیچشی [۳]

در مجاورت بخش ترک خورده تیر با ترک افقی و عمق یکنواخت، ثابت پیچشی فنر (k_t) توسط دیماروگانوف و پایتیس [۴] تعریف شده‌اند. در نتیجه تابع انرژی ترک بصورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$c = \frac{5.346 * h * f\left(\frac{a}{h}\right)}{EI} \quad (1)$$

$$k_t = \frac{I}{c} \quad (2)$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = 1.8624 \left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3.95 \left(\frac{a}{h}\right)^3 + 16.37 \left(\frac{a}{h}\right)^4 - 37.226 \left(\frac{a}{h}\right)^5 + 76.81 \left(\frac{a}{h}\right)^6 - 126.9 \left(\frac{a}{h}\right)^7 + 172 \left(\frac{a}{h}\right)^8 - 143.97 \left(\frac{a}{h}\right)^9 + 66.56 \left(\frac{a}{h}\right)^{10} \quad (3)$$

که در آن E مدول الاستیسیته، I ممان اینرسی، a عمق ترک، h ارتفاع تیر، c پیچیدگی k_t سختی فنر پیچشی و $f(a/h)$ تابع پیچیدگی می‌باشد. ترک یا آسیب در سازه سبب کاهش سختی و افزایش میرایی می‌شود. آدامز و همکارانش [۵] نشان دادند که تغییر در سختی، فرکانس طبیعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و این امر می‌تواند مبنای روش شناسایی آسیب مبتنی بر فرکانس^۲ (FBDD) باشد. دیماروگانوف و چوندرس [۶]، لیانگ و همکارانش [۷] از دیدگاه جایگزینی فنر پیچشی به عنوان ترک استفاده کرده‌اند و یک رابطه بین سختی فنر k ، محل ترک β و فرکانس طبیعی از مودهای ویژه بیان کرده‌اند.

$$K = \frac{|\Delta_2(\beta, \lambda)|}{|\Delta_1(\beta, \lambda)|} \quad (4)$$

که λ پارامتر فرکانس و β محل ترک نرمال شده می‌باشند. $|\Delta_1(\beta, \lambda)|$ و $|\Delta_2(\beta, \lambda)|$ از معادله مشخصه سیستم به دست آمده است. کوشار [۸] با در نظر گرفتن ترک به عنوان فنر پیچشی اثر محل ترک و اندازه

3 Timoshenko beam theory
4 Mode shape
5 Static deflection
6 Change in the first mode shape slopes

1 compliance
2 Frequency-based damage detection

۳-۲- روش شناسایی آسیب بر اساس انحنای شکل مود

کیاو و فان [۱۴] در مطالعه ای که به منظور مقایسه دقت بین روشهای تعیین محل آسیب انجام داده‌اند، بیان کردند که در روش های مبتنی بر شکل مود مجبورند به الگوریتم های بهینه‌سازی یا تکنیک های پردازش سیگنال استناد و تکیه کنند. درحالی که روش های مبتنی بر انحنای شکل مود به طور کلی نوع موثرتری از الگوریتم های تعیین محل آسیب هستند. از اولین کسانی که روش انحنای شکل مود را برای شناسایی محل آسیب در تیر ارائه کردند می‌توان به پاندی و همکارانش [۱۵] اشاره کرد. بر این اساس آن‌ها از اختلاف بین انحنای شکل مود تیر سالم و معیوب، به عنوان ابزاری برای شناسایی محل آسیب استفاده کردند. اگرچه تاکنون فرمول ریاضی که نشان دهنده رابطه بین انحنای شکل مود و آسیب باشد، بیان نشده است. اما اخیراً چاهوری و روی [۱۶] مطالعه خود را بر ایجاد یک فرمول ریاضی بین انحنای شکل مود و آسیب برای تعیین محل و شناسایی آسیب متمرکز کرده و برای بیان فرمول ریاضی از رویکرد انحراف مرتبه اول استفاده کرده‌اند. البته فرمول بیان شده در مطالعه آن‌ها شدت آسیب را نشان نمی‌دهد. هرچند می‌توان یک رابطه ریاضی برای تعیین شدت آسیب بر اساس تغییر در شکل مود و مشتقات آن بیان کرد.

۴-۲- روش شناسایی آسیب مبتنی بر هردو، شکل مود و فرکانس طبیعی

روشهای ترکیبی، روش های نیرومندی برای شناسایی آسیب در سازه می‌باشند. با توجه به تغییرات فرکانس طبیعی و انحنای شکل مود، وانگ و همکارانش [۱۷] روش ترکیبی شناسایی آسیب برای تعیین محل و میزان آسیب در سطح پوسته مخروطی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این روش در دو مرحله انجام می‌شود، ابتدا از تبدیل ویولیت برای شناسایی محل ترک بر اساس انحنای شکل مود مورد استفاده قرار گرفته است و سپس با استفاده از تغییرات فرکانس طبیعی میزان آسیب به دست می‌آید.

۳- توابع هدف

ایده اصلی تابع هدف در مسائل شناسایی آسیب به حداقل رساندن خطا بین مقادیر پارامترهای مودال عددی و تجربی می‌باشد. به منظور مقایسه دو مجموعه از مقادیر مدل عددی و تجربی استفاده از فرمول ریاضی ساده، ضروری می‌باشد.

۱-۳- معیار اطمینان مودال (MAC)

معیار اطمینان مودال یکی از پرکاربردترین ابزارها برای مقایسه کمی از بردار مودال می‌باشد. هدف از این معیار نشان دادن ارتباط بین دو مجموعه از شکل مودها می‌باشد. کاربرد این معیار نیز ارزیابی بین بردارهای مودال تحلیلی و تجربی است. MAC به عنوان ضریب اسکالر نرمال شده، دو مجموعه بردار $\{\phi_A\}$ و $\{\phi_B\}$ محاسبه شده است و فرمول آن به شرح زیر است:

$$MAC_{ij} = \frac{|\{\phi_A\}_i^T \{\phi_B\}_j|^2}{(\{\phi_A\}_i^T \{\phi_A\}_i)(\{\phi_B\}_j^T \{\phi_B\}_j)} \quad (۴)$$

مقادیر صفر از معیار MAC نشان دهنده عدم وجود رابطه سازگاری و مقادیر یک نشان دهنده وجود رابطه سازگاری می‌باشد. با توجه به تمام بردار های مودال i و j از دو مجموعه شکل مود، ماتریس MAC ایجاد شده و ابعاد این ماتریس به تعداد شکل مودهای در نظر گرفته شده وابسته است. به عنوان مثال اگر دو شکل مود از یک مجموعه تجربی و تحلیلی مرتبط هستند، ابعاد

ماتریس MAC، 2×2 خواهد بود. اگر ترم های قطری ماتریس MAC نزدیک یک و ترم های دیگر نزدیک صفر باشد یک سازگاری منطقی بین دو مجموعه به دست می‌آید. همانطور که قبلاً بیان شده است، مقدار نزدیک به صفر معیار MAC نشانه ای از ناسازگاری بردارهای مودال است، که این امر می‌تواند به دلایل زیر باشد:

الف- سیستم غیر ثابت است : در طول زمان تست این موضوع می‌تواند هر زمان که سیستم تحت یک تغییر در جرم یا تغییر در سختی باشد رخ دهد.

ب- سیستم غیر خطی است : سیستم غیر خطی در تابع پاسخ فرکانس ناشی از موقعیت های مختلف یا سیگنالهای تحریک متفاوت ظاهر خواهد شد. اگر معیار MAC مقدار نزدیک به یک دارد، به این مفهوم است که بردارهای مودال سازگارند اما لزوماً به معنی درست بودن آن‌ها نیست. اگر خطاها یکنواخت یا اریب باشد توسط معیار MAC مشخص نمی‌شود.

برخی از خصوصیات تابع MAC از قرار زیر است:

✓ با استفاده از ماتریس MAC هر مجموعه از بردارهای مودال را می‌توان در یک روش نسبتاً کارآمد ارزیابی کرد و هرگونه ناهماهنگی بین آن‌ها با دقت یافت شود.

$$MAC([\phi_A], [\phi_B]) = MAC([\phi_A], [\phi_B])^T \quad (۵)$$

✓ واقعیت این است که شکل‌های مود سازه نشان دهنده شکل ارتعاشی سازه می‌باشند و هر ترکیب خطی از مقادیر شکل مود، ماتریس MAC یکسانی را بوجود می‌آورد که به شرح زیر می‌باشد:

$$MAC([\phi_A], [\phi_B]) = MAC([k, \phi_A], [I, \phi_B]) \quad (۶)$$

۲-۲- ماتریس انعطاف پذیری

همانطور که آشکار است، آسیب بر ماتریس سختی سازه اثر می‌گذارد و خصوصاً سختی در المان آسیب دیده را کاهش می‌دهد. کاهش در سختی مطابق با افزایش انعطاف‌پذیری در سازه می‌باشد. در روشهای نظارت بر سلامت سازه از تغییرات در انعطاف‌پذیری به عنوان یک شاخص آسیب به جای شاخص تغییر در سختی سازه، استفاده می‌شود. این امر ناشی از دلایل زیر می‌باشد [۱۸]:

✓ ماتریس انعطاف‌پذیری توسط مودهای پایین‌تر به دست می‌آید و قابل دسترسی است و تقریب خیلی خوبی، حتی زمانی که تنها تعداد اندکی از مودهای پایین‌تر استفاده شده خواهیم داشت.

✓ ماتریس انعطاف پذیر مستقیماً از شکل‌های مود به دست می‌آید. بنابراین ماتریس انعطاف‌پذیری بصورت دینامیکی اندازه‌گیری شده، که به آسانی از پارامترهای مودال به دست می‌آید و به عنوان یک روش شناسایی آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸].

ماتریس انعطاف‌پذیری بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$[F] = \sum_{j=1}^{N_m} \frac{1}{\omega_j^2} \cdot \{\phi_j\} \cdot \{\phi_j\}^T \quad (۷)$$

یا بصورت ماتریس زیر بیان می‌شود:

$$[F] = [\phi] \cdot [A]^{-1} \cdot [\phi]^T \quad (۸)$$

$$[\phi] = \text{diag}(\omega_j)^2 \quad (۹)$$

هر ستون از ماتریس انعطاف‌پذیری نشاندهنده شکل جابجایی یک سازه همراه با نیروی واحد اعمال شده می‌باشد. در نتیجه، ارزیابی مناسبی از ماتریس انعطاف‌پذیری با تعداد کمی از اولین مودهای فرکانس پایین می‌توان

1 Wavelet transform
2 Modal assurance criterion

شاخص صفر به معنای عدم رابطه بین دو مجموعه شکل مودها و فرکانس طبیعی می باشد، در حالی که مقدار نزدیک به یک تقریباً نشان دهنده یک ارتباط کامل بین نتایج تجربی و تحلیلی می باشد.

بنابراین تابع هدف به منظور کمینه سازی بصورت زیر بیان می شود:

$$F_2 = 1 - MTMAC \quad (16)$$

همانطور که ذکر شد تابع هدف اختلاف بین مقادیر تجربی و عددی پارامترهای مودال از جمله فرکانس طبیعی، شکل مود و انعطاف پذیری و ... می باشد. ساده ترین تابع هدف در ساختار دینامیکی اختلاف بین مقادیر فرکانس طبیعی تجربی و عددی و یا اختلاف بین مقادیر شکل مودهای تجربی و عددی باشد، که توابع هدف آن بصورت زیر بیان می شود.

$$F_3 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\omega_{num j} - \omega_{exp j}}{\omega_{num j}} \right)^2 \quad (17)$$

$$F_4 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\phi_{num j} - \phi_{exp j}}{\phi_{num j}} \right)^2 \quad (18)$$

ω_{num} و ω_{exp} به ترتیب فرکانس های طبیعی به دست آمده از مدل تحلیلی و تجربی و ϕ_{num} و ϕ_{exp} به ترتیب شکل مودهای طبیعی به دست آمده از مدل تحلیلی و تجربی می باشد.

سنتی ترین روش مبتنی بر انعطاف پذیری بیان تابع هدف به عنوان اختلاف بین ماتریس انعطاف پذیری مودال تجربی و عددی می باشد.

$$F_5 = \|F_{exp} - F_{num}\|^2 \quad (19)$$

F_{exp} و F_{num} به ترتیب انعطاف پذیری به دست آمده از مدل تحلیلی و تجربی می باشد.

با توجه به مطالب این فصل آشکار است که یافتن تابع هدف مناسب یکی از مهمترین مسائل شناسایی آسیب در سازه می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله سعی می شود مروری اجمالی بر تحقیقات پیشین در خصوص شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای مودال و توابع هدف متداول در مرحله بهینه سازی در فرایند شناسایی آسیب انجام گیرد.

روش های شناسایی آسیب بر اساس پارامترهای ارتعاشی به چند دسته کلی روش های شناسایی آسیب بر اساس فرکانس طبیعی، شکل مود، انحنا، شکل مود و هردو، شکل مود و فرکانس طبیعی دسته بندی می شوند. آسیب یابی سازه بر اساس تغییرات فرکانس طبیعی آن، قدیمی ترین و معروفترین روش برآورد خرابی می باشد. باید دانست، این ویژگی بیشترین کاربرد را برای تخمین خسارت در گذشته و حال حاضر دارد. این راهکارها دارای مزایا و کاستی هایی نیز می باشد. از دیگر مشخصه های دینامیکی سازه ها، شکل مودها می باشد که در ارزیابی آسیب مورد استفاده قرار می گیرد. اندازه گیری شکل مود دشوارتر از سنجش فرکانس های طبیعی است. شکل مود ویژگی یگانه هر سازه است. در عمل امکان اندازه گیری مودها برای تمام درجه های آزادی وجود ندارد. بنابراین یکی از مشکلات دیگر استفاده از مودها این است که چگونگی شکل های مود تجربی و تحلیلی را به هم وابسته سازد. در روش های مبتنی بر شکل مود مجبورند به الگوریتم های بهینه سازی یا تکنیک های پردازش سیگنال استناد و تکیه کنند. در حالی که روش های مبتنی بر انحنا، شکل مود به طور کلی نوع موثرتری از الگوریتم های تعیین محل آسیب هستند. روش شناسایی آسیب مبتنی بر هردو، شکل مود و فرکانس طبیعی جز روش های ترکیبی محسوب می شوند و روش های نیرومندی برای شناسایی آسیب در سازه می باشند.

محاسبه شود. همانطور که قبلاً تأکید شده است، تابع هدف در مسائل شناسایی آسیب در ترم هایی از اختلاف بین مقادیر عددی و تجربی بیان می شود. به منظور مقایسه مقادیر تحلیلی و تجربی از ماتریس انعطاف پذیری، معیار اطمینان انعطاف پذیری مودال (MACFLEX) به شرح زیر استفاده می شود:

$$MACFLEX_j = \frac{\left(\left\{ \{F_{num j}\}^T \{F_{exp j}\} \right\} \right)^2}{\left(\left\{ \{F_{num j}\}^T \{F_{num j}\} \right\} \right) \left(\left\{ \{F_{exp j}\}^T \{F_{exp j}\} \right\} \right)} \quad (10)$$

این معیار تنها از ترم های قطری ماتریس MAC تعریف شده در معادله (۴) استفاده می کند. در این روش، MACFLEX یک بردار با همان تعداد بردارها در ماتریس انعطاف پذیر می باشد. با توجه به تعداد کل بردارهای انعطاف پذیری (Nm)، یک معیار اطمینان انعطاف پذیر مودال، بصورت زیر تعریف می شود.

زیرنویس exp و num به ترتیب نشان دهنده نتایج آزمایشگاهی (تجربی) و تحلیلی می باشد.

$$MACFLEX = \prod_{j=1}^{N_m} MACFLEX_j \quad (11)$$

همانطور که قبلاً ذکر شده است، شاخص برابر صفر به معنای عدم رابطه بین دو مجموعه انعطاف پذیری می باشد، در حالی که مقدار نزدیک به یک تقریباً به این معناست که هیچ تغییری در انعطاف پذیری نیست و به دنبال آن یک ارتباط کامل بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.

بنابراین تابع هدف به منظور کمینه سازی بصورت زیر بیان می شود:

$$F_1 = 1 - MACFLEX \quad (12)$$

۳-۳- فرکانس های طبیعی و شکل های مود

فرکانس های طبیعی اطلاعات کلی از سازه را ارائه می دهند و می توان آن ها را به دقت از طریق اندازه گیری های دینامیکی شناسایی کرد. انعطاف پذیری گرچه به آسیب محلی بسیار حساس می باشد ولی فقط می تواند یک معیار اولیه در تخمین المان آسیب دیده باشد. برای بهبود این مشکل تابع هدف دوم به عنوان معیار اطمینان کلی اصلاح شده وابسته به شکل مود و فرکانس طبیعی بصورت زیر تعریف می شود.

$$MTMAC_j = \frac{MAC\phi_j}{1 + \left| \frac{\omega_{exp j}^2 - \omega_{num j}^2}{\omega_{exp j}^2 + \omega_{num j}^2} \right|} \quad (13)$$

که در آن:

$$MAC\phi_j = \frac{\left(\left\{ \{\phi_{num j}\}^T \{\phi_{exp j}\} \right\} \right)^2}{\left(\left\{ \{\phi_{num j}\}^T \{\phi_{num j}\} \right\} \right) \left(\left\{ \{\phi_{exp j}\}^T \{\phi_{exp j}\} \right\} \right)} \quad (14)$$

در این معیار نیز، فقط از ترم های قطری ماتریس MAC تعریف شده در معادله (۳-۵) استفاده می شود. چون آن بردارهای مودال از هر مجموعه شکل های مود را مقایسه می کند. با در نظر گرفتن تعداد کل شکل مودها (Nm) یک معیار کلی بصورت زیر تعریف می شود.

$$MTMAC = \prod_{j=1}^{N_m} MTMAC_j \quad (15)$$

- [9] Sk. Maiti, SP. Lele, "Modeling of transverse vibration of short beams for crack detection and measurement of crack extension," Journal Sound vibr, pp. 435-446, 2002.
- [10] J. Lee, "Identification of multiple cracks in a beam using natural frequencies," Journal of Sound and Vibration. 320, pp. 482-490, 2009.
- [11] W. Ren, G. De Roeck, "Structural damage identification using modal data," Journal of Structural Engineering, Vol. 128, pp.96-104, 2002
- [12] C. Maosen, Y. Lin, Z. Limin, Z. Su, R. B, "Sensitivity of fundamental mode shape and static deflection for damage identification in cantilever beams," Mechanical Systems and Signal Processing. 25, pp. 630-643, 2011.
- [13] M. Cao, L. Zhou, Y. Lin, Z. Su, R. Bai, "Sensitivity of fundamental mode shape and static deflection for damage identification in cantilever beams," Mechanical Systems and Single Processing, Vol. 25, pp. 630-643, 2011.
- [14] W. Fan, P.Z. Qiao, "vibration-based damage identification methods: a review and comparative study," Struct health monit, vol. 10, pp. 83-111, 2011.
- [15] AK. Panedy, M. Biswas, MM. Samman, "damage from changes in curvature mode shapes," Journal sound viber, pp. 321-332, 1991.
- [16] S. Ray-Chaudhuri, K. Roy, "Fundamental mode shape and its derivatives in structural damage localization," Journal of Sound and Vibration, pp. 1-10, 2013.
- [17] Y. Wang, J. Xiang, T. Matsumoto, J. Zhansi, "detect damages in conical shells curvature mode shape and wavelet finite element method," International Journal Of Mechanical Sciences. 66, pp. 83-93, 2013.
- [18] M. Papadrakakis, "Structural damage localization and quantification using modern optimization techniques," School of Civil Engineering Institute of Structural Analysis and Seismic Research, 2012.

توابع هدف در مرحله بهینه‌سازی در فرایند شناسایی آسیب نقش مهمی ایفا می‌کنند. ایده اصلی تابع هدف در مسائل شناسایی آسیب به حداقل رساندن خطا بین مقادیر پارامترهای مودال عددی و تجربی می‌باشد. معیار اطمینان مودال یکی از پرکاربردترین ابزارها برای مقایسه کمی از بردار مودال می‌باشد. هدف از این معیار نشان دادن ارتباط بین دو مجموعه از شکل مودها می‌باشد. کاربرد این معیار نیز ارزیابی بین بردارهای مودال تحلیلی و تجربی است. همانطور که آشکار است، آسیب بر ماتریس سختی سازه اثر می‌گذارد و خصوصاً سختی در المان آسیب دیده را کاهش می‌دهد. کاهش در سختی مطابق با افزایش انعطاف‌پذیری در سازه می‌باشد. در روشهای نظارت بر سلامت سازه از تغییرات در انعطاف‌پذیری به عنوان یک شاخص آسیب به جای شاخص تغییر در سختی سازه، استفاده می‌شود. ماتریس انعطاف‌پذیری توسط مودهای پایین‌تر به دست می‌آید و قابل دسترسی است و تقریب خیلی خوبی، حتی زمانی که تنها تعداد اندکی از مودهای پایین‌تر استفاده شده خواهیم داشت. همچنین ماتریس انعطاف‌پذیر مستقیماً از شکل‌های مود به دست می‌آید. بنابراین ماتریس انعطاف‌پذیری بصورت دینامیکی اندازه‌گیری شده، که به آسانی از پارامترهای مودال به دست می‌آید و به عنوان یک روش شناسایی آسیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرکانس‌های طبیعی اطلاعات کلی از سازه را ارائه می‌دهند و می‌توان آن‌ها را به دقت از طریق اندازه‌گیری های دینامیکی شناسایی کرد. انعطاف‌پذیری گرچه به آسیب محلی بسیار حساس می‌باشد ولی فقط می‌تواند یک معیار اولیه در تخمین المان آسیب دیده باشد. برای بهبود این مشکل تابع هدف دوم به عنوان معیار اطمینان کلی اصلاح شده وابسته به شکل مود و فرکانس طبیعی بصورت زیر تعریف می‌شود. همانطور که ذکر شد تابع هدف اختلاف بین مقادیر تجربی و عددی پارامترهای مودال از جمله فرکانس طبیعی، شکل مود و انعطاف‌پذیری و... می‌باشد. ساده‌ترین تابع هدف در ساختار دینامیکی اختلاف بین مقادیر فرکانس طبیعی تجربی و عددی و یا اختلاف بین مقادیر شکل مودهای تجربی و عددی باشد. سنتی‌ترین روش مبتنی بر انعطاف‌پذیری بیان تابع هدف به عنوان اختلاف بین ماتریس انعطاف‌پذیری مودال تجربی و عددی می‌باشد. با توجه به مطالب یاد شده واضح است که یافتن تابع هدف مناسب یکی از مهمترین مسائل شناسایی آسیب در سازه می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] J. Zhao, J.T. De Wolf, "Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection," Journal Struct engng ASCE. 125(4), pp. 410-460, 1999.
- [2] J. Sinha, K. Friswell, and S. Edwards, "Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data," Journal of sound and vibration, pp. 13-38, 2002
- [3] P.F. Rizos, N. Asparagathos, and A.D. Dimarogonas, " identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration models," Journal of sound and vibration, 138(3), pp. 381-388, 1990.
- [4] A.D. Dimarogonas, S.A. paipetis, "analytical methods in rotor dynamics," Elsevier applied scienc, pp. 142-156, 1983, London
- [5] R.D. Adamas, D. Walton, J.E. flitcroft, D. Short, " vibration testing as a non-destructive test tool for composite materials," American society for testing and materials composit reliability, pp.157-159, 1975.
- [6] T.G. Chondros, and A.D. dimarogonas, "Identification of cracks in welded joints of complex structures," Journal of sound and vibration, 69(4), pp. 531-558, 1980.
- [7] R.Y. Linag, F.K. Choy, and J. Hu, " detection of cracks in beam structures using measurements of natural frequencies," Journal of franklin institute, pp.505-518, 1991.
- [8] H. Kaushar, D.S. Sharma, "Crack detection in cantilever beam by frequency based method," procedia engineering, Vol. 51, pp. 770-775, 2013.