دریافت: ۲۵ اسفند ۹۴ پذیرش: ۱۴ اردیبهشت ۹۵

اثر محل و شدت ترک بر پارامترهای مودال تیر یکسرگیردار

احسان جمشیدی[1*]، بهرام جمشیدی[2]، فاطمه تقی خاکی[2]، علیرضا ارغوان[3]

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 ۱۷۹-۳۵۱۴۵، ehsan.jamshidi@semnan.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های متداول شناسایی آسیب در سازه ها بررسی تغییرات پارامترهای مودال سازه قبل و بعد از بروز آسیب است. در این روند که اغلب بر پایه روش‌های بهینه سازی هستند، یک تابع هدف بر پایه فرکانس‌های طبیعی و یا شکل‌مودهای سازه و یا هر دو به کار برده می‌شود. موفقیت در یافتن محل و شدت آسیب در این روش‌ها شدیدا تابع حساسیت تابع هدف به آسیب خواهد بود. از آنجا که تابع هدف خود تابعی از فرکانس‌های طبیعی و یا شکل‌مودهای سازه و یا هر دو است، لازم است حساسیت پارامترهای مودال به محل و شدت آسیب مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور در این مقاله یک تیر یکسرگیردار به صورت عددی شبیه سازی شده است. با تغییر محل و شدت ترک، اثر آنها بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مطالعه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت ترک فرکانس های طبیعی کاهش می‌یابند. از طرف دیگر با جابجا شدن ترک از سر گیردار به سمت انتهای آزاد، تغییرات فرکانس طبیعی از الگویی خاصی پیروی نکرده و برای یک ترک با عمق ثابت کاهش فرکانس‌های طبیعی نسبت به حالت تیر سالم وابسته به موقعیت ترک بر روی تیر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود هرچه ترک به سر گیر دار تیر نزدیک تر باشد، فرکانس طبیعی بیشتر کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که حساسیت شکل مودها نسبت به بروز ترک در تیر پایین است. بنابراین توصیه می‌شود در توابع هدف از فرکانس‌های طبیعی و یا فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها به صورت توامان استفاده گردد.

کلیدواژگان

محل ترک، شدت ترک، فرکانس طبیعی، شکل مود، پارامترهای مودال، تیر یکسرگیردار

Effect of crack location and severity on modal parameters of a cantilever beam

Ehsan Jamshidi[1*], Bahram Jamshidi[2], Fatemeh Taghi Khaki[2], Alireza Arghavan[3]

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 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. Success in detection of location and severity of the damage in these methods is severely a function of sensitivity of the objective function to the damage. As the objective function itself is function of natural frequencies or mode shapes or both of them, it is necessary that the sensitivity of modal parameters to damage location and severity is investigated. To this end, a cantilever beam is simulated numerically in this paper. Changing the location and severity of the damage, the effect of them on natural frequencies and mode shapes is studied. The results show that by increasing damage severity, natural frequencies decrease. On the other hand, moving the crack from the fix end to the free end of the cantilever beam, changes in the natural frequencies does not obey a specific pattern and for a crack of constant severity, decrement of natural frequencies from intact beam depends on the location of crack on the beam. Also it is observed that as the cracks approaches to the fix end, decrement of natural frequencies increased. The results show that the sensitivity of mode shapes to crack is low in beam. Therefore it is recommended to use natural frequencies or both natural frequencies and mode shapes together in objective functions.

Keywords

Crack Severity, Natural Frequency, Mode Shape, Modal Parameters, Cantilever Beam

۱- مقدمه

برای تعیین محل آسیب و تخمین شدت آن در سازه یافتن تابع هدف مناسب امری ضروری می‌باشد. برای این منظور توابع هدف وابسته به پارامترهای مودال سازه شکل مود و فرکانس طبیعی با توابع هدف دیگر که قادر به پیش‌بینی محل آسیب می‌باشند ترکیب می‌شوند. سپس به کمک روشهای بهینه سازی محل و شدت آسیب به دست می‌آید.

موفقیت در یافتن محل و شدت آسیب در این روش‌ها شدیدا تابع حساسیت تابع هدف به آسیب خواهد بود. از آنجا که تابع هدف خود تابعی از فرکانس‌های طبیعی و یا شکل‌مودهای سازه و یا هر دو است، لازم است حساسیت پارامترهای مودال به محل و شدت آسیب مورد بررسی قرار گیرد.

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

آسیب یابی سازه براساس تغییرات فرکانس طبیعی آن، قدیمی‌ترین و معروفترین روش برآورد خرابی می‌باشد. باید دانست، این ویژگی بیشترین کاربرد را برای تخمین خسارت در گذشته و حال حاضر دارد. این راهکارها دارای مزایا و کاستی هایی نیز می‌باشد. فریس ول و سینها [۲] برای بهبود این شیوه، روش ترک تاوانی را در ترک‌یابی تیرها به کار گرفتند. ریزوس و همکارانش[۳] ترک را به عنوان یک فنر پیچشی [۱] در آنالیز مودال تیر یکسرگیر دار با سطح مقطع مستطیل معرفی کرده اند.

در مجاورت بخش ترک خورده تیر با ترک افقی و عمق یکنواخت، ثابت پیچشی فنر توسط دیماروگانوف و پاپتیس [۴] تعریف شده‌اند.

ترک یا آسیب در سازه سبب کاهش سختی و افزایش میرایی می‌شود. آدامز وهمکارانش [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 چوندروس[۶]، لیانگ و همکارانش[۷] از دیدگاه جایگزینی فنر پیچشی به عنوان ترک استفاده کرده‌اند و یک رابطه بین سختی فنر، محل ترک و فرکانس طبیعی از مودهای ویژه بیان کرده‌اند.

کوشار [۸] با در نظر گرفتن ترک به عنوان فنر پیچشی اثر محل ترک و اندازه ترک برروی 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 اندازه‌گیری ها 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 کارگرفت، 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 گونه های آسیب محلی و کلی حساس می‌باشد.

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 پژوهش هایی توسط دیروک [۱۱] صورت گرفته است. ماوسن و همکارانش [۱۲] از سایر محققینی هستند که برای شناسایی ترک مبتنی بر شکل مود تلاش هایی انجام داده‌اند و آن‌ها با توجه به رابطه ذاتی شکل مود[۴] و جابجایی استاتیکی[۵] برای حساس تر شدن پارامتر شکل مود به آسیب، استفاده همزمان دو تکنیک شکل مود و جابجایی استاتیکی را پیشنهاد کرده اند.

روشهای ترکیبی روش های نیرومندی برای شناسایی آسیب در سازه می‌باشند. با توجه به تغییرات فرکانس طبیعی و انحنای شکل مود، وانگ و همکارانش [۱۳] روش ترکیبی شناسایی آسیب برای تعیین محل و میزان آسیب درسطح پوسته مخروطی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این روش در دو مرحله انجام می‌شود، ابتدا از تبدیل ویولیت[۶] 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.

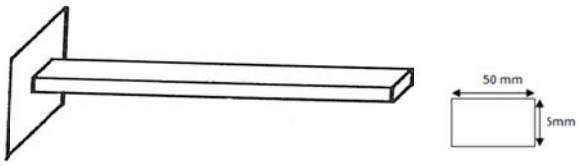
منظور در این مقاله یک تیر یکسرگیردار به صورت عددی شبیه سازی شده است. با تغییر محل و شدت ترک، اثر آنها بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مطالعه می‌شود.

۲- ساخت مدل عددی

۲-۱- مدل کردن تیر یکسرگیردار

برای مدل کردن تیر از المان تیر[۷] تیموشنکو استفاده شده است. این المان، المانی با دو گره است که هر گره دارای دو درجه آزادی می‌باشد. یک درجه آزادی جابجایی و دیگری دورانی است.

تیر مدل شده دارای ۱۰۰۰میلیمتر متر طول بوده و سطح مقطع آن به صورت مستطیلی به ابعاد ۵۰ میلیمتر در ۵ میلیمتر و از جنس فولاد با مدول یانگ ۲۰۰ گیگا پاسکال و چگالی ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. طول تیر به ۶ المان تقسیم شده است. در اینجا تیر به صورت یکسرگیردار مدل شده است برای اعمال این شرط مرزی برروی مدل المان محدود کافیست که در محل سر گیردار تیر، سطر و ستون مربوط به درجه آزادی‌های جابجایی و دورانی را از ماتریس جرم وسختی حذف کنیم. پس از اعمال شرایط مرزی، مدل سازه برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱ شماتیک تیر مدل شده برای شبیه‌سازی

۲-۲- مدل کردن ترک

برای مدل کردن ترک در تیر از روش ارائه شده توسط ویلالبا [۱۴] استفاده شده است. در این روش ترک با کاهش مقدار سختی در ماتریس سختی تیر، مدل شده و ماتریس جرم بدون تغییر باقی می‌ماند. برای این منظور مدول الاستیسیته مربوط به المان آسیب دیده با مدول الاستیسیته رابطه ۱ جایگزین می شود.

$$\mathbf{E_{dj}} = \left(\mathbf{1} - \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{j}}\right) \times \mathbf{E_j} \qquad (۱)$$

1 Rotational spring
2 Frequency-based damage detection
3 Timoshenko beam theory
4 Mode shape
5 Static deflection
6 Wavelet transform
7 Beam element

پارامترهای $\mathbf{E_{dj}}$ و $\mathbf{E_j}$ به ترتیب مدول الاستیسیته المان jام برای شرایط آسیب دیده و سالم هستند. $\boldsymbol{\beta_j}$ یک عامل کاهش مدول الاستیسیته با مقدار مساوی صفر برای المان سالم و مقدار مساوی یک برای حالت آسیب کامل است.

۳- اثر محل ترک بر فرکانس های طبیعی

در این حالت شدت ترک ثابت در نظر گرفته و موقعیت آن از ابتدا تا انتهای تیر تغییر می‌کند. جدول ۱ موقعیت این ترک ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات ترک (محل ترک)

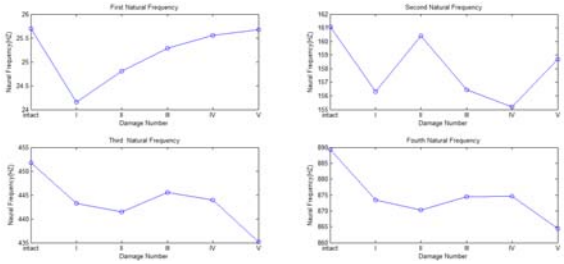
موقعیت ترک (شماره المانها)	درصد (a/h)
۱	۲۰
۲	۲۰
۳	۲۰
۴	۲۰
۵	۲۰

جدول ۲ چهار فرکانس طبیعی اول تیر برای ترک با شدت ثابت در موقعیت‌های مختلف

ترک شماره ۵	ترک شماره ۴	ترک شماره ۳	ترک شماره ۲	ترک شماره ۱	پیش از اعمال ترک	فرکانس طبیعی
۲۵،۶۷	۲۵،۵۶	۲۵،۲۸	۲۴،۸۱	۲۴،۱۶	۲۵،۶۹۱	اول
۱۵۸،۶۹	۱۵۵،۱۸	۱۵۶،۴۴	۱۶۰،۴۲	۱۵۶،۳	۱۶۱،۰۸۶	دوم
۴۳۵،۱۴	۴۴۳،۹۹	۴۴۵،۵۴	۴۴۱،۴۹	۴۴۳،۲۵	۴۵۱،۷۵۹	سوم
۸۶۴،۳۹	۸۷۴،۶۶	۸۷۴،۴۸	۸۷۰،۳۳	۸۷۳،۳۸	۸۸۹،۳۴۴	چهارم

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با جابجا شدن ترک از سر گیردار به سمت انتهای آزاد، تغییرات فرکانس طبیعی از الگویی خاصی پیروی نکرده و برای یک ترک با عمق ثابت کاهش فرکانس‌های طبیعی نسبت به حالت تیر سالم وابسته به موقعیت ترک برروی تیر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود هرچه ترک به سر گیر دار تیر نزدیک تر باشد، فرکانس طبیعی بیشتر کاهش می‌یابد.

شکل ۲ تغییرات چهار فرکانس طبیعی اول بر اساس موقعیت ترک برای یک ترک با شدت ثابت را نشان می‌شود.



شکل ۲ اثر محل ترک بر چهار فرکانس طبیعی اول تیر یکسرگیردار

مشاهده می‌شود که با جابجا شدن ترک از سرگیردار به سمت انتهای آزاد، تغییرات فرکانس طبیعی سازه از الگویی خاصی پیروی نمی‌کند.

۴- اثر شدت ترک بر پارامترهای مودال

برای بررسی اثر شدت ترک در فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها این پارامترها قبل و بعد از اعمال ترک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سه ترک در یک موقعیت مشخص برروی تیر با شدت مختلف مورد مطالعه قرار داده می‌شود. مشخصات این ترک ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ مشخصات ترک (شدت ترک)

شماره ترک	درصد شدت ترک	موقعت ترک (فاصله از سر گیردار-میلیمتر)
۱	۱۰	۳۳۴
۲	۲۰	۳۳۴
۳	۳۰	۳۳۴

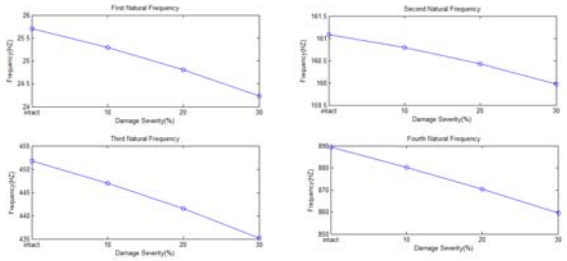
۴-۱- اثر شدت ترک بر فرکانس های طبیعی

درجدول ۴ چهار فرکانس طبیعی اول تیر قبل از اعمال و پس از اعمال ترک‌ها نشان داده شده است.

همچنین تغییرات چهار فرکانس طبیعی اول بر اساس شدت ترک برای یک ترک در موقعیت ثابت در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

جدول ۴ چهار فرکانس طبیعی اول تیر قبل و بعد از اعمال ترک‌ها

ترک شماره۳	ترک شماره ۲	ترک شماره ۱	پیش از اعمال ترک	فرکانس طبیعی(هرتز)
۲۴،۲۳	۲۴،۸۱	۲۵،۲۹	۲۵،۷۰	اول
۱۵۹،۹۷	۱۶۰،۴۳	۱۶۰،۷۹	۱۶۱،۰۸	دوم
۴۳۵،۱۷	۴۴۱،۴۹	۴۴۶،۹۶	۴۵۱،۷۶	سوم
۸۵۹،۵۶	۸۷۰،۳۳	۸۸۰،۲۱	۸۸۹،۳۴	چهارم



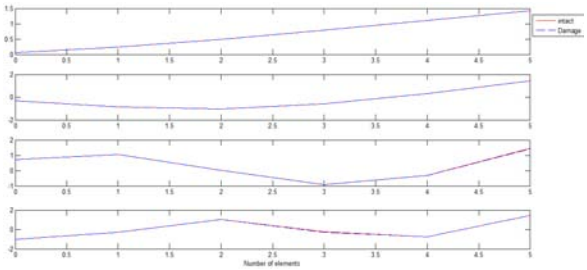
شکل ۳ اثر شدت ترک بر چهار فرکانس طبیعی اول تیر یکسرگیردار

از شکل ۳ واضح است که افزایش شدت ترک سبب کاهش سختی تیر و درنتیجه کاهش فرکانس‌های طبیعی تیر می‌شود.

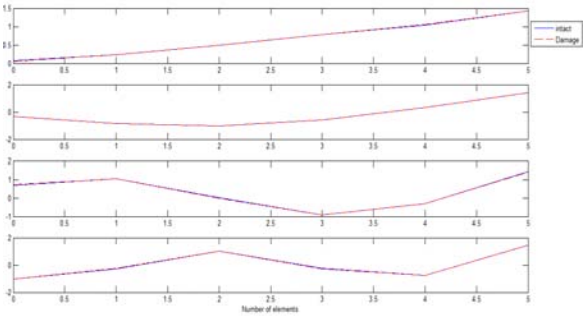
نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برخلاف حالت قبل (تغییر محل ترک) که یک رابطه مشخص بین محل ترک و فرکانس‌های طبیعی وجود نداشت در اینجا (تغییر شدت ترک)، با افزایش عمق ترک فرکانس های طبیعی کاهش می‌یابد.

۴-۲- اثر شدت ترک بر شکل مودها

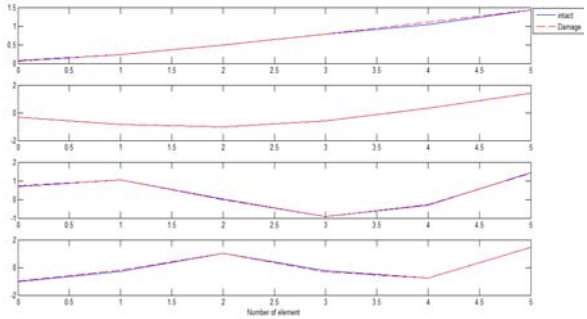
تغییرات چهار شکل مود اول تیر قبل و بعد از اعمال ترک برای سه حالت شدت ترک ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در محل ثابت از تیر در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ترسیم شده است.



شکل ۴ اثر ترک با شدت ۱۰ درصد بر چهار شکل موداول تیر یکسرگیردار



شکل ۵ اثر ترک با شدت ۲۰ درصد بر چهار شکل موداول تیر یکسرگیردار



شکل ۶ اثر ترک با شدت ۳۰ درصد بر چهار شکل موداول تیر یکسرگیردار

نمودار مقایسه شکل مودهای سالم و آسیب دیده نشان می‌دهد که با تغییر شدت ترک با موقعیت ثابت تغییر چشمگیری در شکل مود سازه مشاهده نمی‌شود. این امر بیانگر حساسیت پایین شکل مودها نسبت به بروز ترک در تیر است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک تیر یکسرگیردار به صورت عددی شبیه سازی شده است. با تغییر محل و شدت ترک، اثر آنها بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها مطالعه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شدت ترک فرکانس های طبیعی کاهش می‌یابند. از طرف دیگر با جابجا شدن ترک از سر گیردار به سمت انتهای آزاد، تغییرات فرکانس طبیعی از الگویی خاصی پیروی نکرده و برای یک ترک با عمق ثابت کاهش فرکانس‌های طبیعی نسبت به حالت تیر سالم وابسته به موقعیت ترک بر روی تیر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود هرچه ترک به سر گیر دار تیر نزدیک تر باشد، فرکانس طبیعی بیشتر کاهش می‌یابد.

نمودارهای مقایسه شکل مودهای سالم و آسیب دیده نشان می‌دهد که با تغییر شدت ترک با موقعیت ثابت تغییر چشمگیری در شکل مود سازه مشاهده نمی‌شود. این امر بیانگر حساسیت پایین شکل مودها نسبت به بروز ترک در تیر است. بنابراین توصیه می‌شود در توابع هدف از فرکانس‌های طبیعی و یا فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها به صورت توامان استفاده گردد.

۶- مراجع

[1] J. Zhao, JT. 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 franklim in 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.
[9] Sk. Maiti, SP. Lele, "Modeling of transverse vibration of short beams for crack detection and measurment 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] Y. Wang, J. Xiang, T. Matsumoto, J. Zhansi, "detect damages in conical shells curvature mmde shape and wavelet finite element method," International Journal Of Mechanical Sciences. 66, pp. 83-93, 2013.
[14] J.D. Villalba, J.E. Laier, "Localising and quantifying damage by means of a multi-chromosome genetic algorithm" Advances in Engineering Software. 50, pp. 150–157, 2012.