بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

تشخیص ترک در سازه به کمک اندازه گیری ارتعاشی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

توسط :

مسعود معصومی

استاد راهنما :

دکتر محمد رضا آشوری

اسفند ماه ۱۳۹۰

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر آشوری که در تمامی مراحل انجام این پروژه راهنمای من بوده اند و همچنین از اعضای آزمایشگاه آنالیز مودال دانشگاه سمنان برای راهنمایی هایشان در انجام این پروژه کمال تشکر را دارم.

تقدیم

به

پدرم و **مادرم** که در تمام مراحل زندگی یار و یاور من بوده و هستند

لیست مقالات منتشر شده بر اساس این پژوهش

***Conference papers**:*

- *A non model-based damage detection method using generalized flexibility matrix*

*A. Bakhshizade, M.R. Ashory, **M. Masoumi**, A. Salmani, / IOMAC 2011, Istanbul, Turkey, May 9-11, 2011.*

- *Damage identification from flexibility matrix using wavelet transform*

***M. Masoumi,** M.R. Ashory / IMAC XXX A Conference and Exposition on Structural Dynamics, Jacksonville, Florida USA, January 30 – February 2, 2012*

- *Damage detection from uniform load surface using wavelet analysis*

*H. Neyestani, M. A. Hajmosa, **M. Masoumi** and M. R. Ashory / The International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics (X-Mech-2012), Tehran, Iran, March 6-7, 2012*

- *Continuous wavelet transform of generalized flexibility matrix for damage detection*

***M. Masoumi,** M.R. Ashory / 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME 2012, 16-18 May, 2012 School of Mechanical Eng., Shiraz University, Shiraz, Iran*

Journal paper:

- *Damage localization by wavelet analysis of uniform load surface*

***M. Masoumi,** M.R. Ashory / Journal of Vibroengineering. March 2012. Volume 14, Issue 1. ISSN 1392-8716. (ISI)*

فهرست مطالب

فصل اول

کلیات تحقیق ۱
۱-۱- لزوم انجام تحقیق ۱
۱-۲- هدف تحقیق ۲
۱-۳- نوآوری تحقیق ۲
۱-۴- ساختار فصول پایان نامه ۲

فصل دوم

مروری بر کارهای گذشته ۳
۲-۱- مقدمه ۳
۲-۲- شناسایی ترک با استفاده از ماتریس انعطاف پذیری ۴
۲-۳- شناسایی ترک با کمک تبدیل ویولت ۷
۲-۴- جمع بندی ۱۷

فصل سوم

شبیـــه ســـازی ۲۱
۳-۱- مقدمه ۲۱
۳-۲- مدل کردن سازه تیـــر ۲۲

۳-۳-مدل کردن ترک ۲۶
۳-۴-اثر ترک در فرکانس های طبیعی و شکل مودهای سازه ۲۷
۳-۵-مکان یابی ترک ۳۲
۳-۵-۱-روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی و تبدیل ویولت ۳۳
۳-۵-۲-روش سطح بار یکنواخت و تبدیل ویولت ۳۸
۳-۶-بررسی اثر نویز ۴۳

فصل چهارم

نتایج آزمایشگاهی ۴۷
۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲-تیر یک سر گیردار ۴۸
۴-۲-۱-روش سطح بار یکنواخت و تبدیل ویولت ۴۹
۴-۲-۲-روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی و تبدیل ویولت ۵۰
۴-۳-تیر دو سر آزاد ۵۱
۴-۳-۱- روش سطح بار یکنواخت و تبدیل ویول..... ۵۲
۴-۳-۲- روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی و تبدیل ویولت ۵۳

فصل پنجم

جمع بنـدی و پیشنـهادات ۵۴
۵-۱- مقدمه ۵۴

۵-۲- جمع بنـدی ۵۵
۵-۳-پیشنهادات ۵۶

مراجع ۵۷

پیوست ها ۵۹

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ سیگنال های s_1، s_2 و s_3 همراه با تبدیلات ویولت گسسته ۹

شکل ۲-۲ تابع تبدیل ویولت کلاه مکزیکی [18] ۱۰

شکل ۲-۳ تبدیل ویولت ساکن سیگنال های s_1، s_2 و s_3 [24] ۱۳

شکل ۲-۴ سطوح مختلف تجزیه یک سیگنال توسط تبدیل ویولت (الف) ساکن (ب) گسسته ۱۴

شکل ۲-۵ فرآیند شناسایی ترک در سازه به کمک cwt و swt [24] ۱۵

شکل ۲-۶ نمایی از تست آنالیز مودال یک صفحه برای شناسایی موقعیت ترک[25] ۱۶

شکل ۲-۷ تصویر شماتیک مجموعه تجهیزات لازم برای تست یک صفحه که از چهار سمت گیردار شده است [۲۶] ۱۷

شکل ۳-۱ درجات آزادی المان تیر ۱۹

شکل ۳-۲ المانی از تیر که به منظور استخراج روابط المان محدود مورد بررسی قرار می گیرد ۲۰

شکل ۳-۳ نمای شماتیک تیر مدل شده برای شبیه سازی ۲۱

شکل ۳-۴ نمای شماتیک تیر یک سرگیردار ۲۲

شکل ۳-۵ معرفی پارامترهای مورد استفاده بر روی یک تیر شماتیک ۲۳

شکل ۳-۶ تغییرات چهار فرکانس طبیعی اول تیر بر اساس شدت ترک برای یک ترک در موقعیت ثابت ۲۵

شکل ۳-۷ چهار شکل مود اول سازه قبل و بعد از اعمال ترک – ترک با ۲۰٪ شدت ۲۶

شکل ۳-۸ چهار شکل مود اول سازه قبل و بعد از اعمال ترک – ترک با۳۰٪ شدت ۲۶

شکل ۳-۹ چهار شکل مود اول سازه قبل و بعد از اعمال ترک – ترک با ۴۰٪ شدت ۲۷

شکل ۳-۱۰ تغییرات چهار فرکانس طبیعی اول تیر بر اساس موقعیت ترک برای یک ترک با شدت ثابت ۲۹

شکل ۳-۱۱ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۲۰٪ در موقعیت *x=350 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری . ۳۱

شکل ۳-۱۲ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۳۰٪ و موقعیت *x=350 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری ... ۳۱

شکل ۳-۱۳ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ و موقعیت *x=350 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری .. ۳۲

شکل ۳-۱۴ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت *x=100 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری . ۳۳

شکل ۳-۱۵ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت *x=250 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری . ۳۳

شکل ۳-۱۶ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت *x=400 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری . ۳۴

شکل ۳-۱۷ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت *x=600 mm* – روش ماتریس انعطاف پذیری .. ۳۴

شکل ۳-۱۸ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=700\ mm$ – روش ماتریس انعطاف پذیری .. ۳۵
شکل ۳-۱۹ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۲۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۳۶
شکل ۳-۲۰ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۳۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۳۶
شکل ۳-۲۱ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۳۷
شکل ۳-۲۲ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=100\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۳۸
شکل ۳-۲۳ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=250\ mm$– روش سطح بار یکنواخت ۳۸
شکل ۳-۲۴ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=400\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۳۹
شکل ۳-۲۵ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=600\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۳۹
شکل ۳-۲۶ ضرایب ویولت برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=700\ mm$ – روش سطح بار یکنواخت ۴۰
شکل ۳-۲۷ ضرایب ویولت برای روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی با سطح نویز $p=1$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۱
شکل ۳-۲۸ ضرایب ویولت برای روش سطح بار یکنواخت با سطح نویز $p=1$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۲
شکل ۳-۲۹ ضرایب ویولت برای روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی با سطح نویز $p=2$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۲
شکل ۳-۳۰ ضرایب ویولت برای روش سطح بار یکنواخت با سطح نویز $p=2$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۳
شکل ۳-۳۱ ضرایب ویولت برای روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی با سطح نویز $p=3$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۳
شکل ۳-۳۲ ضرایب ویولت برای روش سطح بار یکنواخت با سطح نویز $p=3$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۴
شکل ۳-۳۳ ضرایب ویولت برای روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی با سطح نویز $p=4$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۴
شکل ۳-۳۴ ضرایب ویولت برای روش سطح بار یکنواخت با سطح نویز $p=4$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۵
شکل ۳-۳۵ ضرایب ویولت برای روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی با سطح نویز $p=5$ برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت $x=350\ mm$ ۴۵

شکل ۳-۳۶ ضرایب ویولت برای روش سطح بار یکنواخت با سطح نویز *p=5* برای ترک با شدت ۴۰٪ در موقعیت *x=350 mm* ۴۶

شکل ۴-۱ تیر یک سرگیردار با ترکی به عمق ۲۰ میلیمتر در ۳۰۰ میلیمتری از سرگیردار ۴۸
شکل ۴-۲ سه شکل مود اول تیر یک سر گیردار ۴۸
شکل ۴-۳ ضرایب ویولت برای تیر یک سرگیردار – روش سطح بار یکنواخت ۴۹
شکل ۴-۴ ضرایب ویولت برای تیر یک سرگیردار – روش ماتریس انعطاف پذیری ۵۰
شکل ۴-۵ تیر دو سر آزاد با ترکی به شدت ۴۰٪ ۵۱
شکل ۴-۶ چهار شکل مود اول مربوط به تیر دو سر آزاد ۵۲
شکل ۴-۷ ضرایب ویولت برای تیر دو سر ازاد - روش سطح بار یکنواخت ۵۲
شکل ۴-۸ ضرایب ویولت برای تیر دو سر ازاد - روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی ۵۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱مشخصات مجموعه اول ترک ها برای بررسی فرکانس های طبیعی و شکل مود ۲۴
جدول ۳-۲ چهار فرکانس طبیعی اول تیر قبل و بعد از ایجاد ترک ها ۲۴
جدول ۳-۳ مشخصات مجموعه دوم ترک ها برای بررسی فرکانس های طبیعی ۲۷
جدول ۳-۴ چهار فرکانس طبیعی اول تیر قبل و بعد از ایجاد ترک ها..... ۲۸

چکـــیده

در دهه های اخیر برای شناسایی ترک در سازه ها روش های مختلفی پیشنهاد شده است که برخی از این روش ها نیاز به دسترسی کامل به کل سازه، برخی نیاز به آگاهی نسبی از محدوده ترک و بعضی نیز نیاز به مدل عددی سازه دارند. در این میان روش هایی که بر اساس تست های ارتعاشاتی بنا شده اند از جمله روش هایی هستند که بدلیل عدم نیاز به دسترسی داشتن به کل سازه و همچنین بی نیازی از داشتن اطلاعات درباره محدوده تقریبی ترک، از جمله راههای نسبتاً کاربردی در این زمینه می باشند. از آنجائیکه وجود ترک در سازه موجب افزایش انعطاف پذیری و کاهش سفتی آن می گردد از این معیارها می توان برای شناسایی موقعیت ترک استفاده نمود. در این پژوهش دو روش تشخیص ترک بر مبنای نتایج تست های ارتعاشاتی توصیف و تشریح شده است و هر دو روش از ماتریس انعطاف پذیری سازه برای شناسایی موقعیت ترک استفاده می کنند. این روش ها که ترکیبی از روابط حاصل شده از ماتریس انعطاف پذیری و روش پردازش سیگنال تبدیل ویولت[1] می باشند، ابتدا به صورت عددی بر روی یک تیر یک سر گیردار اجرا شده و نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفته اند. سه نوع تبدیل ویولت *bior6.8*، *symmetrical 4* و *Gaussian 4* برای این منظور استفاده شده است. برای مشخص شدن این امر که آیا امکان استفاده از این تکنیک ها در حالت تجربی نیز وجود دارد یا خیر، تست آنالیز مودال بر روی دو نمونه تیر در آزمایشگاه انجام گرفته و از این دو روش برای شناسایی محل ترک بر روی آنها استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی، بررسی اثر نویز و همچنین تست های آزمایشگاهی بیان کننده موفق بودن این روش ها در تشخیص موقعیت ترک در سازه تیر بوده اند.

کلمات کلیدی: شناسایی ترک، تبدیل ویولت، ماتریس انعطاف پذیری، آنالیز مودال

[1] *Wavelet transform*

کلیات تحقیق

۱-۱- لزوم انجام تحقیق

سازه های عمرانی و مکانیکی از زمانی که ساخته می شوند شروع به مستهلک شدن می کنند. حفظ و تعمیر و نگهداری این سازه ها موضوع مهمی است که از گذشته مورد توجه بوده است. بر اساس تعریف، تکنیک های غیر مخرب[1] راههایی برای بررسی سازه ها بدون آسیب رساندن یا معیوب کردن آنهاست. تاکنون روش های گوناگونی برای شناسایی غیر مخرب ترک در سازه ها ارائه شده است. روش های ارتعاشاتی شناسایی ترک که از جمله روش های غیر مخرب محسوب می گردند توانایی تشخیص وجود ترک و همچنین موقعیت آن و حتی در برخی روش ها امکان تعیین میزان شدت ترک را نیز فراهم می کنند. از آنجا که این روش ها برای اجرا نیاز به دسترسی کامل به همه قسمت های سازه را ندارند بنابراین از جمله تکنیک های بسیار سودمند برای بررسی سلامت آنها می باشند. با توجه به لزوم بررسی و مطالعه سازه های عمرانی همانند پل ها، ساختمان ها، سدها، ریل های آهن و یا مکانیکی همانند بدنه هواپیماها، خودروها، کشتی ها، لوکوموتیوها با هدف یافتن ترک و خرابی در آنها، تلاش برای یافتن روش ها و تکنیک های جدیدتر و دقیق تر تشخیص ترک و مانیتورینگ سازه ها همواره یکی از زمینه های مهم مورد توجه پژوهشگران بوده است.

[1] *Non-destructive technique*

۱-۲- هدف تحقیق

در این پروژهش سعی بر این است که در ابتدا روش هایی که برای تشخیص ترک بر اساس نتایج تست های ارتعاشی هستند مورد بررسی قرار بگیرد و سپس با ارزیابی آنها تلاش می گردد تکنیک هایی برای بهبود نتایج پیشنهاد و ارائه شود. سپس با انجام شبیه سازی ها و تست های آزمایشگاهی صحت روند ارائه شده مورد بررسی قرار بگیرد.

۱-۳- نوآوری تحقیق

برای شناسایی ترک در سازه های با خصوصیات سازه تیر از روش تابع تبدیل ویولت کمک گرفته شده است. دو روش که هر دو بر مبنای ماتریس انعطاف پذیری بنا شده و قبلاً توسط پژوهشگران دیگر ارائه گردیده و نیاز به اطلاعات سازه هم در حالت سالم و هم پس از ایجاد ترک دارد، در اینجا با اندکی اصلاح برای شناسایی ترک تنها با داشتن اطلاعات سازه معیوب مورد استفاده قرار می گیرد.

۱-۴- ساختار فصول پایان نامه

در فصل دوم مروری بر مفهوم کلی و روش های آنالیز مودال تجربی انجام گرفته است. در فصل سوم کارهای انجام شده توسط پژوهشگران قبلی در زمینه شناسایی ترک در سازه به کمک روش های ارتعاشاتی، به طور خلاصه آورده شده است. فصل چهارم به بیان روش های مورد استفاده برای شناسایی ترک، مدلسازی سازه تیر به کمک روش المان محدود و شبیه سازی روش های تشخیص ترک ارائه شده با استفاده از نرم افزار *MATLAB* اختصاص داده شده است. همچنین اثر نویز بر روی دقت نتایج به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل پنجم دو نمونه تیر در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و پس از انجام تست مودال و استخراج شکل مودهای سازه، هر دو روش شناسایی ترک برای تشخیص موقعیت آن بکار گرفته شده است. در نهایت فصل ششم نیز به جمع بندی نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها و تست های آزمایشگاهی و همچنین ارائه پیشنهادات برای کارهای آینده اختصاص داده شده است.

مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- مقدمه

بدلیل تغییر رفتار دینامیکی سازه های خسارت دیده و دارای ترک نسبت به شرایط اولیه و سالم، روش های پیدا کردن ترک در سازه ها بر اساس پاسخ های دینامیکی آنها قبل و بعد از بوجود آمدن خسارت از گذشته مورد بررسی و توجه قرار داشته است. در سالهای اخیر با توسعه و گسترش تکنیک های پردازش سیگنال[۱] راه کارهای جدیدتر و کاربردی تری در این حوزه ارائه شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد بر اثر ایجاد خسارت در یک سازه پارامترهای مودال (فرکانس های طبیعی، شکل مودها و ضرایب میرایی) دستخوش تغییر می گردند. از آنجایی که در این پروژه برای شناسایی محل ترک از روشی مبتنی بر ماتریس انعطاف پذیری[۲] که از شکل مودهای سازه بدست می آید، همراه با تکنیک تبدیل ویولت[۳] استفاده می شود بنابراین در این فصل سعی می شود که مروری اجمالی بر کارهای انجام شده براساس این دو تکنیک (ماتریس انعطاف پذیری و ویولت) انجام گیرد.

[1] Signal processing
[2] Flexibility matrix
[3] Wavelet transform

۲-۲- شناسایی ترک با استفاده از ماتریس انعطاف پذیری

با توجه به اینکه برای یک سازه با شکل مودهای نرمال شده با جرم[1] Φ داریم :

$$\Phi^{\mathrm{T}} M \Phi = I \qquad (۱-۲)$$

ماتریس سفتی[2] با m شکل مود اندازه گیری شده عبارت است از :

$$K = M\Phi\Omega\Phi^{\mathrm{T}}M = M\left(\sum_{k=1}^{m}\omega_k^2\phi_k\phi_k^T\right)M \qquad (۲-۲)$$

که در آن Ω ماتریس قطری شامل مربع فرکانس های طبیعی است. اگر چه ماتریس سفتی بر اثر ترک دستخوش تغییر می شود و می تواند به عنوان یک معیار برای شناسایی محل خسارت دیده مورد استفاده قرار گیرد اما مشکل اینجاست که شکل مودهای مرتبط با فرکانس های طبیعی بالا در این ماتریس نقش موثری دارند و در هنگام انجام تست، اندازه گیری این شکل مودها چندان آسان نیست. بنابراین ماتریس انعطاف پذیری که بر خلاف ماتریس سفتی مودهای پایین نقش بیشتری در آن دارند، مورد استفاده قرار می گیرد. ماتریس انعطاف پذیری برای یک سازه با m شکل مود اندازه گیری شده به صورت زیر ساخته می شود :

$$F_T = f_{i,j} = \sum_{k=1}^{m}\frac{\phi_k^i\phi_k^j}{\omega_k^2} \qquad (۳-۲)$$

در این معادله ϕ_k^i و ϕ_k^j به ترتیب i امین و j امین عنصر k شکل مود نرمال شده با جرم است و ω_k نشان دهنده، k امین فرکانس طبیعی سیستم می باشد. $f_{i,j}$ نیز معرف انعطاف پذیری در نقطه i ام در اثر بار واحد وارد بر نقطه j ام است. این ماتریس نخستین بار توسط *Pandey* [1] برای یافتن محل ترک در سازه مورد استفاده قرار گرفت. او در کار خود با تعیین این ماتریس با استفاده از مودهای پایین سازه در حالت قبل و بعد از ایجاد ترک و بدست آوردن اختلاف بین آنها نه تنها وجود خسارت بلکه محل آن را نیز بر روی تیر تعیین کرد. با در نظر گرفتن F_i و F_d به عنوان ماتریس های انعطاف پذیری قبل و بعد از بوجود آمدن ترک داریم :

$$\Delta = F_i - F_d \qquad (۴-۲)$$

به ازای هر درجه آزادی j $\bar{\delta}_j$ ماکزیمم مقدار قدرمطلق عناصر ستونی Δ است :

[1] Mass normalized mode shapes
[2] Stiffness matrix

$$\overline{\delta_j} = max_j \left|\delta_{ij}\right| \qquad (۵-۲)$$

بنابراین δ_{ij} عناصر تشکیل دهنده بردار Δ بوده و می توانیم از این بردار به عنوان بردار اندازه گیری تغییرات انعطافپذیری برای هر نقطه اندازه گیری شده در طول تست، استفاده کنیم. صحت این روش هم به طور تئوری و هم به طور عملی در مقاله ارائه شده توسط او مورد بررسی قرار گرفته است.

از دیگر کارهای انجام شده در شناسایی ترک به کمک ماتریس انعطاف پذیری می توان به مقاله ***bernal*** [2] اشاره کرد. با توجه به اینکه در آنالیز مودال محیطی تنها پاسخ های سازه اندازه گیری می شود و اندازه گیری نیرو وجود ندارد بنابراین امکان تشکیل ماتریس انعطاف پذیری نیست. برای حل این مشکل ***bernal*** یک ماتریس جایگزین معرفی می کند که تنها تفاوت آن با ماتریس انعطاف پذیری در یک ضریب می باشد و سپس در کار خود دو روش برای تعیین این ضریب نیز معرفی می کند. ***Duan*** [3] دیگر کسی است که برای شناسایی ترک با استفاده از آنالیز مودال محیطی تلاش هایی انجام داده و او نیز ماتریس جایگزینی بجای ماتریس انعطاف پذیری معرفی نمود. ***Jaishi*** [4] یک الگوریتم بهینه سازی برای حداقل کردن یک تابع هدف که از مانده انعطاف پذیری[1] و شیب آن تشکیل شده است، بکار می گیرد و با کمک آن موقعیت ترک را در سازه می یابد. ***Yang*** [5] از تجزیه مقدار ویژه تغییرات انعطاف پذیری، برای شناسایی ترک استفاده می کند. روش او بر اساس ارزیابی مقادیر ویژه غیر صفر به عنوان المان های خسارت دیده استوار است. او در کار دیگرش [6] رهیافت جدیدی با هدف یافتن آسیب در سازه ها با استفاده از آنالیز مودال محیطی ارائه می دهد. بررسی آماری خطا در روش ماتریس انعطاف پذیری توسط ***Tomaszewska*** [7] انجام گرفته است و به منظور ایجاد تمایز بین نتایج درست و نتایج اشتباه، استفاده همزمان از دو تکنیک ماتریس انعطاف و بکارگیری شکل مودها به طور مستقیم توصیه شده است. ***Reyners*** [8] یک ایده جدید بر اساس ماتریس انعطاف پذیری ارائه داد که آن را انعطاف پذیری محلی[2] نامید. او تنها با کمک اندازه گیری پاسخ های سازه، ماتریس انعطاف پذیری شبه استاتیکی[3] را تشکیل داد و به کمک تغییرات در سفتی موضعی، محل ترک را شناسایی کرد.

در سال های اخیر روشی دیگری با عنوان روش ماتریس انعطاف پذیری عمومی[4] توسط ***Li*** [9] و ارائه شده است. بر این اساس آنها بجای بکار بردن اختلاف بین ماتریس انعطاف سازه سالم و معیوب، از اختلاف ماتریس انعطاف پذیری عمومی، که خود معرفی نموده اند، بین سازه سالم و معیوب به عنوان ابزاری برای

[1] Flexibility residual
[2] Local flexibility
[3] Quasi-static flexibility matrix
[4] Generalized flexibility matrix

شناسایی ترک استفاده کرد ه اند. با در نظر گرفتن ϕ_{uk} و ω_{uk} به عنوان شکل مود و فرکانس طبیعی k ام سازه پیش از بوجود آمدن آسیب و ϕ_{dk} و ω_{dk} به عنوان شکل مود و فرکانس طبیعی سازه پس از ایجاد ترک این معادله بصورت زیر تعریف می گردد :

$$\Delta F = \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{\omega_{dk}^4} \phi_{dk} \phi_{dk}^T - \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{\omega_{uk}^4} \phi_{uk} \phi_{uk}^T \qquad (۶-۲)$$

بدلیل متناسب بودن با توان چهارم فرکانس طبیعی تاثیر خطای ناشی از برش[1] (در نظر نگرفتن) مودهای بالاتر در این رابطه بسیار کمتر می شود.

روشی دیگر بر مبنای همان ماتریس انعطاف پذیری توسط *Zhang* [10] ارائه شد. در این روش بجای استفاده از ماتریس انعطاف از سطح بار یکنواخت[2] استفاده می شود. بردار تغییر شکل $\{\bar{f}\}$ تحت بار یکنواخت که سطح بار یکنواخت نامیده می شود، به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\{\bar{f}\} = \begin{bmatrix} f_{1,1} & f_{1,2} & \cdots & f_{1,n} \\ f_{2,1} & f_{2,2} & \cdots & f_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n,1} & f_{n,2} & \cdots & f_{n,n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix} \qquad (۷-۲)$$

در نتیجه در یک سیستم خطی، انحنای مودال[3] در نقطه *i* بخاطر بار یکنواخت در روی کل سازه از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$\bar{f}(i) = \sum_{j=1}^{n} f_{i,j} = \sum_{j=1}^{n} \left(\sum_{k=1}^{m} \frac{\phi_k^i \phi_k^j}{\omega_k^2} \right) = \sum_{k=1}^{m} \frac{\phi_k^i \sum_{j=1}^{n} \phi_k^j}{\omega_k^2} \qquad (۸-۲)$$

در این رابطه *n* نمایش دهنده تعداد درجات آزادی سیستم است. سطح بار یکنواخت به عنوان بردار انحنای سازه تحت بار یکنواخت عبارت است از:

$$U_{\mathrm{T}} = \left\{ \bar{f}(i) \right\} = \mathrm{F}_T . L \qquad (۹-۲)$$

[1] Truncation
[2] Uniform load surface
[3] Modal deflection

در این معادله $L = \{1, \dots, 1\}^T_{1\times n}$ بردار بار واحد نمایش دهنده بار یکنواخت اعمالی بر روی سازه است. از مزایای این روش می توان به سهم کمتر مودهای بالاتر که موجب همگرایی بیشتر با استفاده از مودهای پایین تر می گردد و آسیب پذیری کمتر در برابر نویز بدلیل این حقیقت که جمع تمام ضرایب مودال[1] یک شکل مود خاص $\sum_{j=1}^{n} \phi_k^j$ خطا را در هر نقطه اندازه گیری متوسط می گیرد. ضرایب مودال مودهای بالاتر تمایل بیشتری نسبت به ضرایب مودال مودهای پایین تر به از بین بردن اثر یکدیگر دارند در نتیجه مودهای پایین تر تاثیر و نقش بیشتری در ضرایب سطح بار یکنواخت بازی می کنند.

با تعیین سطح بار یکنواخت برای یک سازه مرحله بعد یافتن ناپیوستگی و بی نظمی های موجود در این کمیت است که به عنوان نشانه ترک در نظر گرفته می شود. اولین و ساده ترین روش استفاده از روش تفاضل محدود و یا به عبارتی مشتق دوم سطح بار یکنواخت می باشد. از آنجا که مشتق دوم یک تابع بخوبی نمایش دهنده ناپیوستگی در آن می باشد بنابراین می توان از مشتق دوم برای یافتن ناپیوستگی تابع سطح بار یکنواخت استفاده کرد. بغیر از این روش تاکنون از تکنیک های دیگری نیز بر برای این کار استفاده شده است که از جمله می توان روش چندجمله ایی ***Chebyshev*** [11] را نام برد. از مزیای این تکنیک در مقایسه با روش تفاضل محدود می توان به خطای کم آن در هنگام وجود تعداد نقاط اندازه گیری کم نام برد جائیکه بکارگیری روش تفاضل محدود منجر به خطاهای بسیار بزرگ می شود. از دیگر روش هایی که تاکنون به کار رفته می توان روش استفاده از فرکتالها[2] و صاف کردن ناپیوستگی را بیان کرد [11,12]. در این کار از رهیافت تبدیل ویولت[3] برای شناسایی ناپیوستگی و محل ترک استفاده خواهد شد.

۲-۳- شناسایی ترک با کمک تبدیل ویولت

تبدیل ویولت به دلیل خاصیت ذاتی در آن در شناسایی ناپیوستگی های کوچک موجود در سیگنال ها، به عنوان ابزاری قوی در شناسایی ترک در ساز ها مورد توجه قرار گرفته است. در سال های اخیر تلاش های زیادی برای استفاده از تبدیل ویولت به منظور شناسایی موقعیت ترک در سازه انجام گرفته است. ***Taha*** [13] و همکارانش یک مرور کلی بر روی روش های بر مبنای تبدیل ویولت انجام داده اند. نخستین کسی که از تبدیل ویولت پاسخ زمانی سازه برای شناسایی خسارت در آن استفاده کرد ***Surace*** [14] بود. او پاسخ زمانی بدست آمده از یک تیر که به طور عددی شبیه سازی شده بود را به عنوان داده اولیه استفاده کرده و به کمک تبدیل

[1] Modal coefficients
[2] Fractals
[3] Wavelet transform