فرم چکیده پایان‌نامه تحصیلی دوره تحصیلات تکمیلی

دفترمدیریت تحصیلات تکمیلی

نام خانوادگی دانشجو: **راغبی** نام: **مهدی**

استاد یا اساتید راهنما: **دکتر انوشیروان فرشیدیانفر**

دانشکده: **مهندسی** رشته: **مکانیک** گرایش: **طراحی کاربردی** مقطع: **دکتری**

تاریخ دفاع: **۱۳۹۰/۲/۳** تعداد صفحات: **۱۵۰**

عنوان پایان‌نامه: **بهبود روش ردیابی چند ترک همزمان در تیر اویلر-برنولی به کمک آنالیز فرکانسهای ارتعاشی**

کلید واژه‌ها: ردیابی ترک، تیر اویلر-برنولی، آنالیز فرکانس ارتعاشی، بروز رسانی مدل المان محدود

چکیده

ردیابی ترک در مراحل اوّلیه ایجاد آن، به منظور تعمیر و نگهداری سازه و در مواردی حفظ جان آدمی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در طول سه دهه گذشته تلاشهای فراوانی به منظور گسترش و بهبود روشهای ردیابی غیر مخرب انجام شده‌است. این تلاشها از آن جهت ارزشمند می‌باشد که بدانیم سالیانه مبالغ زیادی صرف تعمیر و نگهداری سازه‌هایی مانند پلهای بزرگراهها و یا تجهیزات دوار موجود در پالایشگاهها و نیروگاهها می‌شود.

در قسمت اول این پایان نامه، به مطالعه روش ردیابی ترک، بر مبنای تغییرات فرکانس ارتعاشی سازه پرداخته شده است. ترک به کمک مدل فنر چرخشی مدلسازی شده و به کمک روش ماتریس انتقال، معادله مشخصه ارتعاشی تیر ترکدار با شرایط مرزی متفاوت بدست آمده است. سپس معادلاتی که تغییرات فرکانس طبیعی تیر را به پارامتر نشان دهنده ترک مربوط می سازد، بدست آمده است. این دستگاه معادلات به روشی دقیق تر از سایر مراجع حل گردیده و نتایج ردیابی ترک بهبود یافته است. به کمک چند مثال، دقت روش پیشنهادی برای ردیابی موقعیت و اندازه ترک با سایر مراجع مقایسه گردیده است. همچنین بر خلاف مراجع دیگر که برای ردیابی چند ترک همزمان اثر هر ترک را به صورت جداگانه در نظر گرفته و از معادله مشخصه تیر حاوی یک ترک به ردیابی ترکها پرداخته‌اند، در پژوهش حاضر از معادله مشخصه تیر حاوی دو ترک برای ردیابی دو ترک همزمان استفاده شده و در نتیجه نتایج ردیابی عمق و موقعیت ترکها بهبود یافته است.

در قسمت دوم پایان نامه به کمک روش بروزرسانی مدل المان محدود به ردیابی ترک پرداخته شده است. برای مدلسازی تیر ترکدار از مدل کاهش ممان اینرسی تیر در اطراف ترک استفاده شده است. در این بخش نشان داده میشود که بدون استفاده از روش بروز رسانی مدل المان محدود و تنها با رسم رویه سه بعدی جذر میانگین مربعی[1] درصد خطای فرکانسها برحسب موقعیت و عمق ترک و یافتن مینیمم این رویه نیز میتوان به ردیابی ترک پرداخت. همچنین نشان داده میشود که مدل ارائه شده برای شرایط مرزی تیر یکسرگیردار چندان دقیق نیست، در نتیجه موقعیت و عمق ترک را نمیتوان در این حالت به کمک این دو روش با دقت مناسبی پیش بینی نمود.

دربخش پایانی به مدلسازی تیر ترکدار در نرم افزارANSYS به کمک مدل فنر چرخشی و مدل کاهش سفتی خمشی پرداخته شده است. برای مدلسازی تیر از المانهای مختلفی مانند المان Beam2D، المان Plane82 و همچنین المان سه بعدیSolid95 استفاده شده است. نتایج حاصل از مدلسازیها به خوبی بر نتایج تجربی که در سایر مراجع به آنها اشاره شده است، منطبق می‌باشد. همچنین مزایا و معایب دو روش ردیابی ترک، که در بخشهای پیشین به آنها اشاره گردید، با ذکر چند مثال بیان گردیده است.

امضای استاد راهنما

سپاسگزاری

هم اکنون که به یاری خداوند متعال این پایان نامه ارائه می شود، از زحمات بیدریغ استادان بزرگوارم جناب آقای دکتر فرشیدیانفر استاد راهنمای اینجانب و جناب آقای دکتر احمدیان، که افتخار شاگردی ایشان را در دوره کارشناسی ارشد داشتم، نهایت سپاس و تشکر را دارم که در همه مدت انجام این کار پژوهشی با راهنمایی‌های ارزشمند، انتقادهای سازنده، پیشنهادها و تشویقها بسیار یاریم کردند و بدون مهارتها و پشتیبانی‌هایشان انجام این کار پژوهشی غیر ممکن بود.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر حمید احمدیان، استاد دانشگاه علم و صنعت ایران که علاوه بر ارزیابی این کار پژوهشی، رنج سفر به شهر مقدس مشهد را نیز پذیرفتند، تشکر می‌کنم.

از استادان ارجمند جناب آقای دکتر اختراعی طوسی، جناب آقای دکتر معاونیان و جناب آقای دکتر سازگاران که زحمت ارزیابی این کار پژوهشی را پذیرفتند و در ارائه بهتر این پایان نامه مساعدت فرمودند کمال سپاس و تشکر را دارم.

دانشم را مدیون زحمات بی‌دریغ استادان ارجمند و بزرگوار گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، جناب آقای دکتر کدخدایان، جناب آقای دکتر طهانی، جناب آقای دکتر ابوالبشری و جناب آقای دکتر برادران رحیمی هستم.

در انجام این کار پژوهشی سرکار خانم‌ها رمضانی و فرجامی و دیگر مسئولان محترم کتابخانه دانشکده مهندسی و همچنین دوستان عزیزم آقایان مصطفی صمدی و محمد شعیبی دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک دانشگاه استنفورد، برای دسترسی به مقالات و کتابهای مورد نیاز از هیچ‌گونه کمکی فروگذار نکردند و جناب آقای حسینی مسئول محترم خدمات، یاری رساندند. از همه این بزرگواران تشکر می‌کنم.

در پایان از زحمات بیدریغ و صبورانه همسر عزیزم که در طول مدت تحصیل و پژوهش یار و مشوقم بود، سپاسگزاری می نمایم.

تقدیم به روح پدر بزرگوارم و

تقدیم به مادر مهربانم که نخستین آموزگارم بود

فهرست عنوان‌ها

عنوان **صفحه**

چکیده یک
سپاسگزاری دو
تقدیم سه
فهرست عنوان‌ها چهار
فهرست شکل‌ها هفت
فهرست جدول‌ها هشت

فصل یکم: مقدمه

۱. ۱: مقدمه ۱
۱. ۲: هدف و چشم انداز پایان نامه ۲
۱. ۳: سازماندهی فصول پایان نامه ۳

فصل دوم: مرور تحقیقات انجام شده در زمینه ردیابی ترکها

۲. ۱: مقدمه‌ای بر مدلسازی ترک ۷
۲. ۱. ۱: مدلهای ترک باز ۷
۲. ۱. ۲: مدل ترک تنفسی ۱۲
۲. ۲: روشهای ردیابی ترک ۱۳
۲. ۲. ۱: تغییرات فرکانس ۱۴
۲. ۲. ۲: تغییرات شکل مد ۱۶
۲. ۲. ۳: تغییرات کرنش و انحناء در شکل مد ۱۸
۲. ۲. ۴: تغییرات انعطاف پذیری ۱۹
۲. ۲. ۵: روش به روز کردن ماتریس ۲۰
۲. ۲. ۶:تحلیلهای غیر خطی ۲۲
۲. ۳: خلاصه و جمع بندی ۲۴

فصل سوم:حل دستگاه معادلات مستطیلی به کمک روش تجزیه مقدار تکین

۳. ۱: مقدمه ۲۷
۳. ۲: تجزیه مقدار تکین ۲۸
۳. ۳: قضیه تجزیه مقدار تکین ۲۹

۳. ۴: رابطه بین تجزیه مقدار تکین و تجزیه مقدار ویژه ۳۲
۳. ۵: کمترین مربعات و معکوس پنروز یا شبه معکوس ۳۴
۳. ۶: عدد شرطی ۳۷
۳. ۷: خلاصه و جمع بندی ۳۸

فصل چهارم: بهبود روش ردیابی چند ترک همزمان در تیر اویلر-برنولی

۴. ۱: مقدمه ۴۰
۴. ۲: مدلسازی ارتعاشی تیر ترکدار ۴۱
۴. ۳: ردیابی کردن ترک ۴۴
۴. ۴: حل مثالهای عددی ۴۶
۴. ۵: خلاصه و جمع بندی ۶۰

فصل پنجم:
بروز رسانی مدل المان محدود با استفاده از اطلاعات مدها و به کمک روشهای تکراری

۵. ۱: مقدمه ۶۳
۵. ۲: مروری بر سیستمهای چند درجه آزادی نامیرا ۶۳
۵. ۲. ۱: تعامد بردارهای ویژه ۶۳
۵. ۲. ۲: مدهای متعامد وزنی ۶۴
۵. ۲. ۳: ماتریس مدی Φ ۶۵
۵. ۳: مزیتها و معایب روشهای تکراری ۶۶
۵. ۴: روشهای مبتنی بر تابع جریمه ۷۰
۵. ۴. ۱: محاسبه ماتریس حساسیت ۷۲
۵. ۴. ۲: بیشتر بودن اندازه‌گیریها نسبت به پارامترهای مجهول ۷۲
مثال۵. ۱: یک تیر طره‌ای شبیه سازی شده ۷۳
۵. ۴. ۳: بیشتر بودن پارامترهای مجهول نسبت به اندازه‌گیریها یا داده‌های دارای نویز ۷۶
مثال۵. ۲: تیر طره‌ای شبیه سازی شده ۷۹
مثال۵. ۳: تیر طره‌ای آزمایشگاهی ۸۲
۵. ۵: توضیحی راجع به ماتریسهای وزنی ۸۵
۵. ۶: خلاصه و جمع‌بندی ۸۶

فصل ششم:
ردیابی ترک در تیرها با استفاده از اطلاعات فرکانسی و بروز رسانی مدل المان محدود

۶. ۱: مقدمه ۸۸
۶. ۲: تئوری ۸۸
۶. ۳: مدلسازی ترک ۸۸
۶. ۴: مدلسازی المان تیر ترکدار ۹۱

۶. ۵: تخمین عمق و اندازه ترک ۹۱
۶. ۶: بررسی دقت مدل ارائه شده ۹۴
۶. ۷: چند مثال از ردیابی ترک ۹۷
۶. ۸: خلاصه و جمع بندی ۱۰۳

فصل هفتم:

مدلسازی تیرترکدار درنرم افزارAnsys به کمک مدل فنرچرخشی و کاهش سفتی خمشی

۷. ۱: مقدمه ۱۰۵
۷. ۲: مدلسازی تیر ترکدار در نرم افزار Ansys به کمک مدل فنر چرخشی ۱۰۵
مثال اول: مدلسازی تیر یکسرگیردار بدون ترک ۱۰۵
مثال دوم: شبیه سازی تیر فولادی ترکدار به کمک مدل فنر چرخشی ۱۰۹
مثال سوم: شبیه سازی تیر آلومینیومی یکسرگیردار حاوی ترک به کمک مدل فنر چرخشی ۱۱۱
۷. ۳: مدلسازی تیر ترکدار در نرم افزار Ansys به کمک مدل کاهش سفتی خمشی ۱۱۳
۷. ٤: مدلسازی دو بعدی و سه بعدی تیر ترکدار در نرم افزار Ansys ۱۱۵
۷. ۵: مقایسه دو روش مختلف ردیابی ترک در تیرها ۱۱۷
مثال اول: ردیابی یک ترک در تیر با شرایط مرزی دو سرآزاد ۱۱۷
مثال دوم: ردیابی دو ترک همزمان در تیر با شرایط مرزی دو سرآزاد ۱۱۸
۷. ۶: خلاصه و جمع بندی ۱۲۲

فصل هشتم: جمع بندی و نتیجه گیری ۱۲۴

مراجع ۱۲۹
پیوست الف: برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده به کمک نرم افزار MATLAB ۱۳۵
پیوست ب: محاسبه سختی فنر چرخشی معادل ترک یکطرفه باز ۱۴۹
پیوست ج: مقالات منتشر شده یا پذیرفته شده در مجلات و کنفرانسهای داخلی و خارجی ۱۵۰

فهرست شکل‌ها

شماره شکل	عنوان شکل	صفحه
۲-۱	مدل تیر کوتاه	۸
۲-۲	المان تیر با ترک عرضی تحت تأثیر نیروهای اعمالی	۱۰
۲-۳	نوسانگر دو خطی	۱۲
۲-۴ الف	مدل گسترده تیر یکسرگیردار حاوی ترک	۱۳
۲-۴ ب	مدل تغییرات عمق ترک به صورت تابعی از زمان	۱۳
۲-۵	ارتعاشات اجباری یک نوسانگر دوخطی	۲۳
۲-۶	شبکه دولایه همراه با پس انتشار	۲۴
۳-۱	عمل ماتریس شبه وارون یا A^{+}	۳۶
۴-۱	مدلسازی ترک با فنر چرخشی	۴۷
۴-۲ الف	تیر دو سر مفصل دارای دو ترک	۵۴
۴-۲ب	نحوه المان بندی تیر برای ردیابی کردن ترکها	۵۴
۴-۳	منحنی سختی برحسب موقعیت ترک	۵۶
۴-۴	منحنی سفتی فنر چرخشی برحسب موقعیت ترک در مثال دوم	۵۹
۵-۱	سیستم شامل جرم، فنر و دمپر مجزا	۶۷
۵-۲	مدل المان محدود تیر طره‌ای مثال ۱. ۵	۷۱
۵-۳	مدل المان محدود تیر طره‌ای مثال ۲. ۵	۷۶
۵-۴	همگرایی پارامترهای بروز شده برای حالت دوم از مثال ۲. ۵	۷۸
۵-۵	همگرایی فرکانسهای طبیعی برای حالت دوم از مثال ۲. ۵	۷۹
۵-۶	تیر طره‌ای آزمایشگاهی مثال ۳. ۵	۸۰
۶-۱	تیر دارای چند ترک	۸۵
۶-۲	مقایسه کاهش سفتی در نزدیک ترک برای کاهش مثلثی (پررنگ) و کاهش پیشنهادی توسط کریستیدز و بار برای ترکی با عمق 0.25	۸۷
۶-۳	المان با تغییرات سفتی مثلثی برای مدلسازی ترک	۸۷
۶-۴	مدل المان محدود برای تیر یکسرگیردار	۹۱
۶-۵	همگرایی تخمین عمق و موقعیت ترک الف: تخمین عمق ب: تخمین موقعیت	۹۵
۶-۶	درصد خطای فرکانس طبیعی به صورت تابعی از عمق و موقعیت ترک	۹۸
۶-۷	درصد خطای فرکانس طبیعی به صورت تابعی از عمق و موقعیت ترک برای حالت اول(ج)	۹۹
۷-۱	المانهای استفاده شده برای مدلسازی تیر	۱۰۳
۷-۲	تیر یکسرگیردار مثال اول مدل شده در نرم افزار انسیس به کمک المانهایSolid95	۱۰۳
۷-۳	شکل مدهای تیر مدلسازی شده در نرم افزارAnsys به کمک المان Solid95	۱۰۵
۷-۴	شکل مدهای تیر با شرایط مرزی یکسرگیردار و حاوی دو ترک	۱۰۷
۷-۵	شکل مدهای تیر آلومینیومی با شرایط مرزی یکسرگیردار و حاوی یک ترک	۱۰۹
۷-۶	مدلسازی تیر آلومینیومی با شرایط مرزی دوسرآزاد و حاوی یک ترک با المانهای PLANE 82	۱۱۰

شماره شکل	عنوان شکل	صفحه
۷-۷ الف	منحنی سفتی برحسب موقعیت ترک برای مثال اول، حالت الف: $\beta=0.327, K=125.00$	۱۱۲
۷-۷ ب	منحنی سفتی برحسب موقعیت ترک برای مثال اول، حالت ب: $\beta=0.316, K=45.52$	۱۱۲
۷-۸ الف	منحنی سفتی برحسب موقعیت ترک اول برای مثال دوم، حالت ج: $\beta=0.459, K=43.47$	۱۱۵
۷-۸ ب	منحنی سفتی برحسب موقعیت ترک دوم برای مثال دوم، حالت ج: $\beta=0.336, K=35.15$	۱۱۵

فهرست جدول‌ها

شماره جدول	عنوان جدول	صفحه
۱-۴	فرکانسهای طبیعی تیر دوسر مفصل دارای دو ترک	۵۳
۲-۴	مقایسه موقعیت واندازه ترک پیش بینی شده با مقدار واقعی برای تیر دوسرمفصل مثال ۱	۵۶
۳-۴	مقایسه ردیابی موقعیت ترک در تیر دوسرمفصل مثال دوم	۵۸
۴-۴	مقایسه موقعیت واندازه ترک پیش بینی شده با مقدار واقعی برای تیر دوسرمفصل مثال دوم	۵۸
۱-۵	محاسبه ماتریس همبستگی مدها برای سیستم نشان داده شده در شکل ۵-۱	۶۷
۲-۵	پارامترهای اولیه و شبیه‌سازی شده برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۱	۷۲
۳-۵	نتایج حالت اول برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۱	۷۲
۴-۵	نتایج حالت دوم برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۱ نتایج حالت اول برای تیر طره‌ای مثال۵. ۲	۷۳
۵-۵	نتایج حالت اول برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۲	۷۷
۶-۵	نتایج حالت سوم برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۲	۷۹
۷-۵	نتایج حالت اول برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۳	۸۱
۸-۵	نتایج حالت دوم برای تیر طره‌ای مثال ۵. ۳	۸۲
۱-۶	مشخصات تیرهای استفاده شده در آزمایشهای تجربی	۹۱
۲-۶	فرکانسهای طبیعی تیر یکسرگیردار با یک ترک بر حسب هرتز	۹۲
۳-۶	فرکانسهای طبیعی تیر آلومینیومی دوسرآزاد دارای یک ترک بر حسب هرتز	۹۳
۴-۶	فرکانسهای طبیعی تیر آلومینیومی دوسرآزاد دارای دو ترک بر حسب هرتز	۹۳
۵-۶	فرکانسهای طبیعی تیر فولادی دوسرآزاد با یک ترک بر حسب هرتز	۹۳
۶-۶	تخمین عمق و موقعیت ترک برای تیر یکسرگیردار(تخمینهای اولیه: d_{c1}=2mm,x_1=400mm)	۹۴
۷-۶	تخمین عمق و موقعیت ترک برای تیردوسرآزاد (تخمینهای اولیه: d_{c1}=2mm,x_1=832mm)	۹۴
۸-۶	تخمین عمق و موقعیت ترک برای تیردوسرآزاد(تخمینهای اولیه: d_{c1}=2mm,x_1=630mm)	۹۵
۹-۶	تخمین عمق و موقعیت دو ترک برای تیر آلومینیومی دوسرآزاد (تخمینهای اولیه: d_{c1}=1mm,x_1=400mm و d_{c2}=1mm,x_2=1000mm)	۹۶
۱۰-۶	تخمین عمق و موقعیت دو ترک برای تیر آلومینیومی دوسرآزاد هنگامیکه تنها یک ترک موجود است (تخمینهای اولیه: d_{c1}=1mm,x_1=400mm و d_{c2}=1mm,x_2=1000mm)	۹۷
۱-۷	فرکانسهای طبیعی تیر یکسرگیردار	۱۰۴
۲-۷	فرکانسهای طبیعی مربوط به ارتعاشات خمشی تیر یکسرگیردار	۱۰۴
۳-۷	فرکانسهای طبیعی تیر یکسرگیردار حاوی دو ترک	۱۰۶
۴-۷	فرکانسهای طبیعی تیر یکسرگیردار آلومینیومی	۱۰۸
۵-۷	فرکانسهای طبیعی تیر دوسر آزاد آلومینیومی حاوی یک ترک	۱۱۰
۶-۷	مقایسه تخمین عمق و موقعیت ترک برای تیر فولادی دوسرآزاد به روش مراجع [۶۱]و[۷۸]	۱۱۱
۷-۷	فرکانسهای طبیعی تیر آلومینیومی دوسرآزاد دارای دو ترک بر حسب هرتز	۱۱۳
۸-۷	مقایسه ردیابی موقعیت دو ترک در تیر آلومینیومی دوسرآزاد مثال دوم، حالت ج	۱۱۵
۹-۷	مقایسه تخمین عمق و موقعیت ترک برای تیرآلومینیومی دوسرآزاد	۱۱۶

فصل اول:

مقدمه

۱. ۱: مقدمه

هنگامی که ترکی در یک المان از سازه ایجاد می‌شود سفتی محلی کاهش یافته و مقاومت سازه کاهش می یابد. اگرچه تمامی سازه‌ها با هدف مقاوم بودن در برابر بارهای وارده طراحی می‌شوند، امّا به خاطر بارهای بیش از حد مجاز اعمال شده به آنها و یا بارهای خستگی که به ایجاد ترک می انجامند، در معرض آسیب قرار دارند. رشد پیوسته یک ترک ردیابی نشده، ممکن است نهایتاً به خرابی کامل سازه منجر شود و در مواردی این مسأله باعث ازبین رفتن جان انسانها و تحمیل هزینه های گزاف می‌شود. بنابراین ردیابی ترک در مراحل اوّلیه ایجاد آن، به منظور مصونیت، تعمیر و نگهداری سازه و در مواردی حفظ جان آدمی از اهمیت فراوانی برخوردار است.

در طول سه دهه گذشته تلاشهای فراوانی به منظور گسترش و بهبود روشهای ردیابی غیر مخرب انجام شده‌است. برخی از روشهای ردیابی مانند ردیابی مستقیم و چشمی، ردیابی به کمک امواج مافوق صوت، رادیوگرافی، نفوذ پذیری اکوستیکی، ردیابی به کمک ذرات مغناطیسی و رنگ نفوذ پذیر روشهای مرسوم ردیابی هستند که به خوبی گسترش یافته اند و امروزه برای ردیابی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روشهای دیگر مانند ردیابی بر پایه مشخصات ارتعاشی، انتشار موج و تکنیکهای لیزر روشهای جدیدتری هستند که در حال گسترش می باشند. اکثر روشهای ردیابی غیر مخرب دارای این محدویت هستند که در مورد ردیابی نوع خاصی از آسیب مفید هستند و برای ردیابی انواع دیگر چندان مناسب نمی باشند. معمولاً برای ردیابی نهایی در هر سازه لازم است که از چند روش ردیابی استفاده شود.

به عنوان یک روش ردیابی غیر مخرب جدید، ردیابی بر پایه مشخصات ارتعاشی به عنوان یکی از روشهای امید بخش معرفی شده است که دارای مزایای مشخص در مقایسه با روشهای سنتی می‌باشد. مشخصات دینامیکی از قبیل فرکانسها و پاسخهای به دست آمده از تحلیل داده ها، ویژگیهای کلی برای سازه‌ها هستند بنابراین ردیابی بر پایه مشخصات ارتعاشی می تواند به عنوان یک روش ردیابی کلّی مورد استفاده قرارگیرد. در این روش مانند برخی از روشهای دیگر ردیابی، نیازی به تمیز کردن سطوح نمی‌باشد. همچنین به کمک این روش می‌توان به ردیابی ترکهایی که از محل نصب سنسورها دور هستند و همچنین سطوحی که قابل دسترسی نیستند، پرداخت. از لحاظ هزینه نیز این روش، می‌تواند ارزانتر و سریعتر باشد.

ایده اصلی در روش ردیابی ارتعاشی آن است که اطلاعاتی راجع به سلامت سازه به کمک اندازه‌گیری مشخصات ارتعاشی آن به دست آوریم؛ اگر تغییری در مشخصات ارتعاشی سازه ایجاد شود، این تغییر می تواند به کاهش سفتی سازه که به دلیل وجود ترک ایجاد شده است، مربوط باشد. ترک می تواند بوسیله تعدادی سنسور که در روی سازه نصب شده‌اند و تحلیل داده های به دست آمده از آنها ردیابی شود.

تئوری ردیابی بر پایه ارتعاش سازه، عموماً با در نظر گرفتن سازه‌های ساده مانند تیر و صفحه شکل گرفته است.

با توجه به تئوریهای ارتعاشی مربوط به تیرها و صفحه‌ها می‌توان گفت فرکانسهای طبیعی یک تیر یا صفحه به جذر صلبیت خمشی تیر یا صفحه وابسته است. صلبیت خمشی محلی در یک سازه با وجود ترک تغییر می کند و میزان این تغییر به اندازه و موقعیت ترک بستگی دارد. با دانستن اندازه و موقعیت ترک می‌توان تغییرات مشخصات ارتعاشی سازه را به کمک مدلهای صحیح ترک و روشهای حل مناسب به دست آورد. به طور معکوس اگر تغییرات ارتعاشی سازه، اندازه‌گیری شده باشد می‌توان به ردیابی موقعیت و اندازه ترک اقدام نمود.

نحوه مدل سازی ترک در روش ردیابی ارتعاشی مرحله‌ای مهم می‌باشد. مدل تیر کوتاه یکی از اولین مدلهای ارائه شده‌است که در آن وجود ترک به کمک یک تیر کوتاه با صلبیت خمشی کاهش یافته در محل ترک مدل می‌شود. مدل دیگر مدل کاهش ممان اینرسی و مدل یانگ است که در آن وجود ترک با تغییر در ممان اینرسی مدل می‌شود. این روش معمولاً با تحلیل المان محدود همراه است.

این مدلها بعداً به کمک مکانیک شکست بهبود یافتند و برای مدل سازی منطقه ترک از ماتریس انعطاف پذیری محلی که توسط مکانیک شکست مشخص می شد استفاده گردید. در محل ترک از یک فنرچرخشی استفاده می‌شود که دو قسمت تیر را به هم مربوط می‌سازد و خواص دینامیکی فنر توسط ماتریس انعطاف پذیری تعریف می‌شود.

روشهای ردیابی ترک با استفاده از مدلهای دقیقتر ترک و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بهبود یافتند. به طور کلّی دو روش اصلی در روشهای ردیابی ترک بر مبنای مشخصات ارتعاشی وجود دارد: تحلیل فرکانسی و تحلیل مودال؛ که در هر دو روش به ثبت اطلاعات سنسور در حوزه زمان نیاز است، سپس این اطلاعات به کمک تبدیل فوریه سریع به حوزه فرکانس تبدیل می‌شود. در تحلیل فرکانسی یک روش ساده آن است که فرکانسهای اندازه‌گیری شده را با فرکانسهای پیش بینی شده برای یک سازه ترک دار مقایسه نموده و با این مقایسه به وجود ترک پی برد. روشهای دیگر معمولاً شامل تعریف یک پارامتر نشانگر وجود ترک هستند که به نحوی به تغییرات فرکانس سازه مربوط می‌شود[۱]، تا بتوان به این وسیله به ردیابی موقعیت ترک پرداخت. در تحلیل مودال نشانگرهای ترک زیادی بر اساس فرکانسها و شکل مدها تعریف شده‌اند مانند معیار همبستگی مدها[1]، کرنش یا انحنای شکل مد، حساسیت مودال و تابع تبدیل فرکانسی.

۱. ۲: هدف و چشم انداز پایان نامه

در بین مدلهایی که برای مشخص سازی ترک در روش ردیابی ارتعاشی استفاده شده‌اند، مدلی که بر پایه مفاهیم مکانیک شکست استوار شده، به طور گسترده ای برای تحلیل اثر ترک بر روی پاسخ ارتعاشی سازه استفاده شده است. در این مدل انعطاف پذیری محلی در موقعیت ترک بر اساس مفاهیم مکانیک شکست محاسبه می‌شود. این مدل عموماً در مورد سازه های تشکیل شده از تیر کاربرد دارد و تیر بستگی به تعداد

1: Modal Assurance Criteria

ترک موجود در آن به دو یا چند قسمت تقسیم می‌شود. زیر سازه‌ها به وسیله یک فنر چرخشی که برای مدل سازی استفاده می‌شود به یکدیگر متصل می‌شوند. هر زیرسازه در واقع یک تیر مستقل است که معادله حرکت مربوط به خود را داراست. مجموعه‌ای از معادلات حرکت به کمک شرایط پیوستگی در محل فنر چرخشی به یکدیگر مربوط می‌شوند. اگر چه روندهای مختلفی برای مشخص کردن وجود ترک در سازه‌ها به کمک روشهای ارتعاشی به وجود آمده است، امّا هنوز هیچ یک از روشها کامل و جامع نیست و به روشهای ردیابی ترک دقیق و مؤثری نیاز است تا بتوان ترکها را با عمق های مختلف و در موقعیت های متفاوت دقیقاً ردیابی نمود.

در بخش اول این پایان نامه، از مدل فنر چرخشی برای مدلسازی ترک استفاده شده است. آنگاه دستگاه معادلات خطی که تغییرات فرکانس تیر را به پارامتر وجود ترک مربوط می‌سازد بدست آمده و با حل نمودن دقیق‌تر این دستگاه معادلات، ردیابی ترک در تیر بهبود یافته است. به کمک چند مثال که در مراجع دیگر ذکر گردیده، درستی روش ارائه شده بررسی گردیده است.

در قسمت دوم پایان نامه، به کمک روش بروزرسانی مدل المان محدود به ردیابی ترک پرداخته می‌شود. در این بخش برای مدلسازی ترک از مدل کاهش ممان اینرسی تیر در اطراف ترک استفاده شده است. در فصل ششم نشان داده میشود که بدون استفاده از روش بروز رسانی مدل المان محدود و تنها با رسم رویه سه بعدی جذر میانگین مربعی[1] درصد خطای فرکانسها برحسب موقعیت و عمق ترک و یافتن مینیمم این رویه نیز میتوان به ردیابی ترک پرداخت. همچنین نشان داده میشود که مدلسازی شرایط مرزی در تیر یکسرگیردار چندان دقیق نیست، در نتیجه موقعیت و عمق ترک را نمیتوان در این حالت به کمک این دو روش با دقت مناسبی پیش بینی نمود.

در فصل پایانی، به شبیه سازی تیر ترکدار بر مبنای مدل فنر چرخشی و مدل کاهش سفتی خمشی در نرم افزار انسیس پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی المانهای تیر، از سه المان مختلف یعنی المان beam2D، المان دو بعدی Plane 82 و المان سه‌بعدی Solid 95 استفاده گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازیها با دقت خوبی بر نتایج تحلیلی و نتایج تجربی که در سایر مراجع به آن اشاره شده است، منطبق می‌باشد. همچنین در بخش انتهایی این فصل دو روش مختلف ردیابی ترک با یکدیگر مقایسه گردیده و با حل چند مثال، مزایا و معایب هریک بررسی گردیده است.

۱. ۳: سازماندهی فصول پایان نامه

در فصل دوم این پایان نامه، مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه ردیابی ترک صورت گرفته است و مهمترین روشهای ردیابی ترک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

1: root mean square

در فصل سوم، پیش زمینه های تئوری لازم برای انجام تحقیق ارائه شده است که شامل تئوری پایه ای ارتعاشات تیر و روش تجزیه مقدار تکین برای حل دستگاه معادلات نا سازگار می‌باشد.

در فصل چهارم، ترک در تیر به کمک مدل فنرچرخشی مدلسازی شده و معادلات خطی که تغییرات فرکانسی تیر را به موقعیت ترک مربوط می‌سازد بدست آمده است. این معادلات به روشی موسوم به حل کمترین مجموع مربعات حل شده و کارایی این روش حل در مورد چند مثال با مراجع دیگر مقایسه گردیده است.

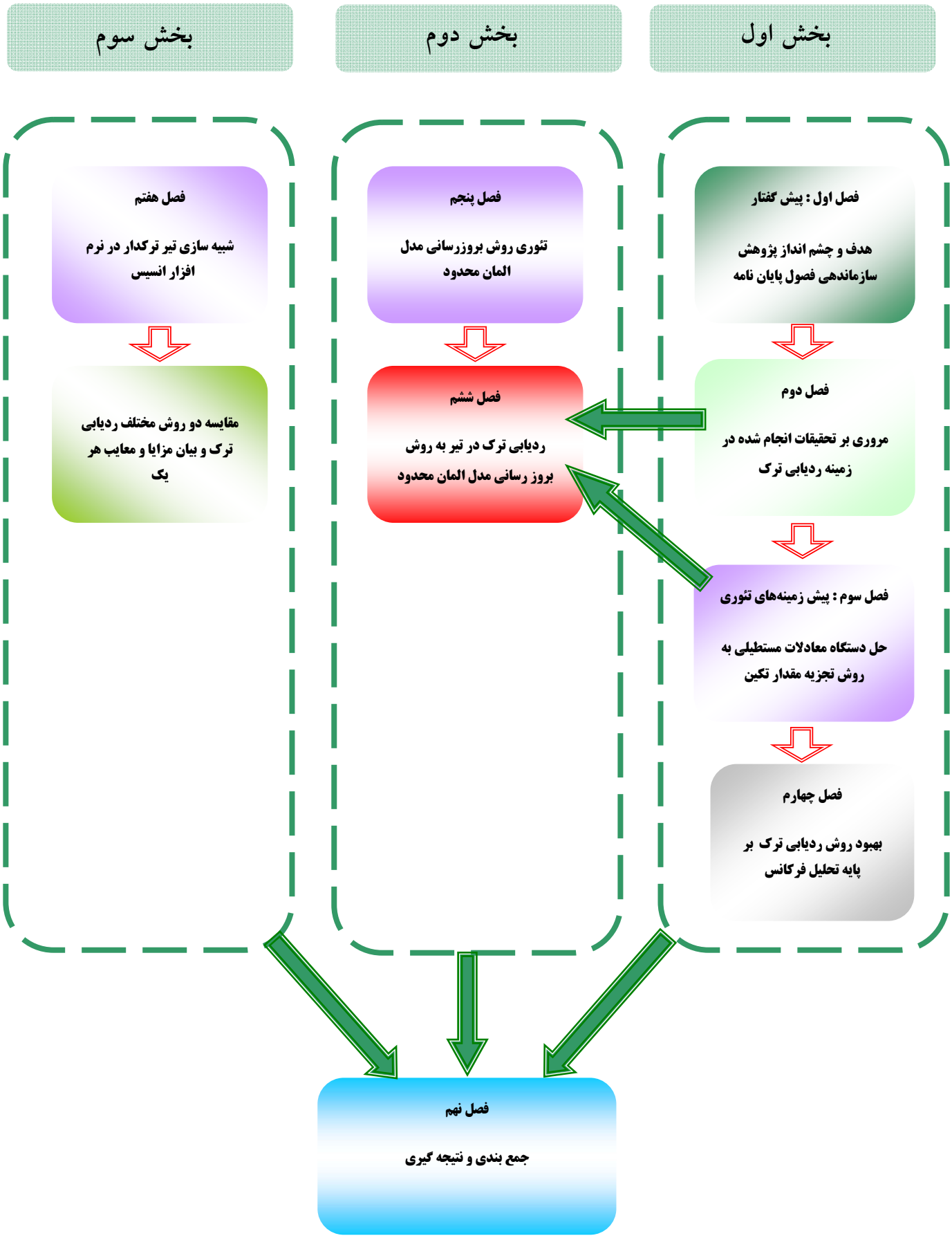
در فصل پنجم، تئوری روش بروز رسانی مدل المان محدود توضیح داده شده و به کمک مثالهای مختلف، تبیین گردیده است.

موضوع فصل ششم، ردیابی ترک در تیر به کمک روش بروز رسانی مدل المان محدود می‌باشد.

در فصل هفتم به شبیه سازی تیر ترکدار در نرم افزار انسیس بر مبنای مدل فنر چرخشی و مدل کاهش سفتی خمشی پرداخته شده است. همچنین دو روش مختلف ردیابی ترک که در فصول چهار و شش بیان گردیده با یکدیگر مقایسه شده و مزایا و معایب هر کدام بررسی گردیده است.

در نهایت، یافته های حاصل از این کار پژوهشی، خلاصه و جمع بندی شده و برای تحقیقات آینده توصیه‌هایی ارائه گردیده است.

نحوه ارتباط فصول مختلف پایان نامه با یکدیگر در نمودار صفحه بعد خلاصه شده است:


بخش اول
بخش دوم
بخش سوم
فصل اول : پیش گفتار
هدف و چشم انداز پژوهش
سازماندهی فصول پایان نامه
فصل دوم
مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه ردیابی ترک
فصل سوم : پیش زمینه‌های تئوری
حل دستگاه معادلات مستطیلی به روش تجزیه مقدار تکین
فصل چهارم
بهبود روش ردیابی ترک بر پایه تحلیل فرکانس
فصل پنجم
تئوری روش بروزرسانی مدل المان محدود
فصل ششم
ردیابی ترک در تیر به روش بروز رسانی مدل المان محدود
فصل هفتم
شبیه سازی تیر ترکدار در نرم افزار انسیس
مقایسه دو روش مختلف ردیابی ترک و بیان مزایا و معایب هر یک
فصل نهم
جمع بندی و نتیجه گیری

فصل دوم:

مرور تحقیقات انجام شده در زمینه ردیابی ترکها

۲. ۱: مقدمه‌ای بر مدلسازی ترک

ایده اصلی در ردیابی ترک بر مبنای مشخصات ارتعاشی[1]، اندازه‌گیری مشخصات دینامیکی و ارتعاشی تیر در طول حیات کاری آن است تا بتوان ازآنها به عنوان یک پایه برای ردیابی اندازه و موقعیت ترک استفاده نمود. باید توجه داشت که ردیابی دقیق ترک از طریق اندازه‌گیری مشخصات دینامیکی به مقدار زیادی به مدلسازی دقیق ترک بستگی دارد. یکی از اثرات شناخته شده ترک، کاهش سفتی و در نتیجه کاهش فرکانس طبیعی سازه ترکدار و همچنین تغییر یافتن مدهای ارتعاشی آن می‌باشد. این تغییرات مشخصاً به نوع، اندازه و موقعیت ترک بستگی دارد. مدل سازی دقیق این پارامترها در مدل ترک نشان می دهد که مشخصات دینامیکی چگونه تغییر می کنند.

مدلهایی که تاکنون ساخته شده‌اند، عموماً بخش مربوط به تغییرات سفتی بر اثر وجود ترک را به خوبی نمایان می کنند. تقریباً غیر ممکن است بتوان مدلی را بوجود آورد که در آن تغییرات میرایی لحاظ شده باشد. دلیل عمده آن به این واقعیت مربوط می‌شود که میرایی در سازه‌ها کاملاً پیچیده و خیلی حساس به شرایط محیطی مانند، دما، رفتار ماده و غیره می‌باشد. مدلسازی ترک با در نظر گرفتن تغییرات سفتی می تواند به مدلهای ترک همیشه باز و مدل ترک تنفسی (ترک باز و بسته شونده) تقسیم شود. در مدل ترک باز ترک در طول ارتعاش همواره باز می ماند. در مدل ترک تنفسی:

۱) ترک در بخشی از یک سیکل ارتعاشی کاملاً باز و در بخش دیگر از آن سیکل کاملاً بسته است (مدل سویچینگ)

۲) ترک به صورت جزئی در بخشی از سیکل ارتعاشی باز می‌شود و در قسمت بعدی سیکل ارتعاشی به طور جرئی بسته شده و در انتهای آن سیکل ارتعاشی کاملاً بسته میشود.

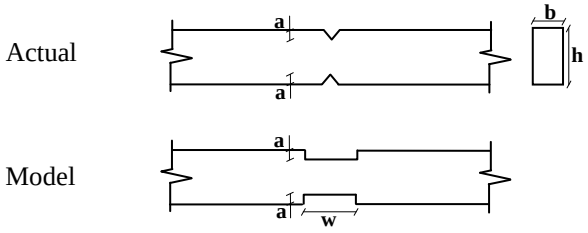
۲. ۱. ۱: مدلهای ترک باز

میزان کاهش سفتی یک سازه به دلیل وجود یک ترک باز مقداری ثابت است. به عبارت دیگر سفتی یک سازه به دلیل وجود ترک باز در آن کاهش می یابد اما سفتی این سازه در طول ارتعاشات تغییری نمی کند. تعدادی مدل تحلیلی برای بررسی کاهش سفتی به دلیل وجود ترک باز در سازه ارائه شده‌اند. این مدلها شامل مدل تیر کوتاه، مدل کاهش مدول یانگ و ممان اینرسی سازه می‌باشد. همچنین مدلهایی بر مبنای مکانیک شکست نیز شکل گرفته است.

1:Vibration Based Identification

مدل تیر کوتاه

وجود ترک در تیر، سطح مقطع تیر و یا سفتی خمشی (EI) تیر را که باعث مقاومت تیر در برابر تغییر شکل می‌شود را کاهش می دهد. در این مدل وجود ترک به کمک در نظر گرفتن یک المان تیر کوتاه با سفتی خمشی کاهش یافته، (شکل ۲-۱) در محل ترک مدل می‌شود.



شکل ۲-۱: مدل تیر کوتاه[۲]

طول تیر کوتاه برابر عرض معادل ترک در نظر گرفته می‌شود. این مدل احتمالاً متداولترین مدل استفاده شده تا اواسط دهه هفتاد میلادی بود[۲]. به کمک این مدل می‌توان به راحتی یک حل تحلیلی را به وجود آورد و به کمک روشهای المان محدود درستی نتایج را بررسی نمود.

کریسمر[1] [۳] رابطه بین تغییرات در نخستین فرکانس طبیعی یک تیر ترکدار با شرایط مرزی دو سر مفصل که ترک در آن به کمک المان تیر کوتاه مدل شده بود به کمک روشهای انرژی بررسی نمود. او از نتایج آزمایشگاهی برای کالیبره کردن عبارات مربوط به عرض معادل ترک استفاده نمود. او متوجه شد که عرضی معادل ۵ برابر عرض عملی ترک نتایج قابل قبولی در مقایسه با نتایج حاصل از روش تحلیلی و آزمایشگاهی بدست می دهد. تامسون[2] [۴] از مدل تیر کوتاه برای مشخص کردن اثر ترک بر روی ارتعاشات عرضی، طولی و پیچشی یک میله باریک استفاده نمود. البته او متذکر شد که این روش تنها هنگامی قابل کاربرد خواهد بود که عرض معادل ترک از طریق آزمایش تعیین گردد. پتروسکی[3] [۵] آزمایشهایی را بر روی یک نمونه خمش سه نقطه‌ای انجام داد و سپس نتایج را به همراه تئوری مکانیک شکست برای محاسبه عرض معادل ترک به کار برد.

وجود ترک در تیر باعث عدم پیوستگی در توزیع تنش می‌شود. همچنین تغییرات محلی از قبیل کرنش، انحناء و شیب در اطراف ترک در طول تیر اتفاق می افتد. بنابراین می‌توان گفت به خاطر تغییرات در توزیع تنش، بخشی از تیر در مقابل بار مقاومت کمتری از خود نشان خواهد داد. مهمترین مشکل مدل تیر کوتاه

1: Krismer
2: Thomson
3: Petroski

آن است که این مدل تغییرات ناگهانی را که در تغییر شکلهای محلی به خاطر ترک بوجود می آید را لحاظ نمی کند.

مدل کاهش مدول یانگ و ممان اینرسی

این مدل معمولاً به همراه تحلیلهای المان محدود استفاده می‌شود. از آنجایی که ترک سفتی محلی را کاهش می دهد، می‌توان برای مدل کردن وجود ترک تغییری در مدول الاستیسیته ماده فرض نمود. مدول یانگ یک خاصیت ماده است. این مدل تنها نیاز به یک اصلاح ساده در تحلیل المان محدود دارد و به هیچ المان جدیدی نیاز نیست. کاهش اینرسی در واقع حذف یک بخش محلی را در سازه نشان می دهد که این موضوع به نوبه خود تغییر در سفتی محلی سازه را باعث می‌شود.

توزیع پیچیده تنش و کرنش در اطراف نوک ترک به خوبی در این مدل بررسی نمی‌شود. به طور کلی مدل خیلی ساده و تقریبی است. تغییراتی که به کمک این مدل در فرکانس طبیعی محاسبه میشود ممکن است دقت کمی داشته باشد و نوعاً بیشتر از مقدار واقعی، تخمین زده می‌شود.

یون[۶] از این مدل برای بررسی یک تیر طره‌ای ترکدار استفاده نموده است. او اساساً بر روی حساسیت پارامترهای مختلف مودال از قبیل شکل مد و شیب شکل مد مطالعه نموده است. از محققین دیگری که از این مدل استفاده نمودند می‌توان به پندی و همکاران[1] [۷] و سالاوو و ویلیامز[2] [۸] اشاره نمود.

مدل مکانیک شکست

وجود ترک در یک عضو سازه باعث تغییر در انعطاف پذیری محلی می‌شود که تابعی از عمق ترک می‌باشد. این تحول، رفتار دینامیکی سیستم و مشخصات پایداری آن را دستخوش تغییر می کند. ایده اصلی در این مدل آن است که وجود ترک در تیر را به کمک ماتریس انعطاف پذیری محلی که از روابط مکانیک شکست بدست می آید، مدل سازی نماید[۱].

برای محاسبه کردن انعطاف پذیری محلی یک عضو ترکدار تحت بارگذاری عمومی، تیری را با ترکی به عمق a همانند شکل ۲-۲ در نظر بگیرید. تیر دارای ارتفاع h و عرض b می‌باشد. تیر تحت نیرو یا ممان P_i قرار دارد.

تحت یک بارگذاری عمومی، جابجایی اضافی u_i در جهت نیروی اعمالی P_i که به خاطر وجود ترک ایجاد می‌شود از طریق قضیه کاستیگلیانو محاسبه می‌شود. بدین منظور اگر Φ تابع انرژی کرنشی به خاطر وجود ترک باشد بر طبق قضیه کاستیگلیانو جابجایی اضافی برابر است با[۹]:

1: Pandey et al.
2: Salawu and Williams

$$u_i = \frac{\partial \Phi}{\partial P_i} \qquad (۱-۲)$$

تابع انرژی کرنشی Φ بر طبق روابط مکانیک شکست برابر است با:

$$\Phi = \int_0^{A_c} \frac{\partial \Phi}{\partial A} dA = \int_0^{A_c} J dA \qquad (۲-۲)$$

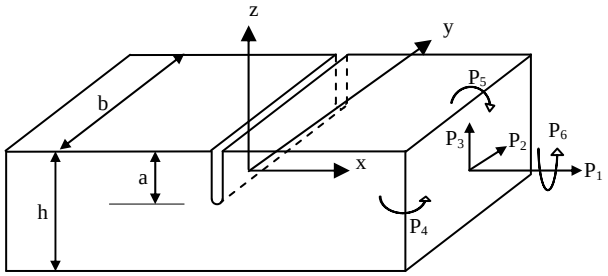
که در این رابطه J دانسیته انرژی کرنشی و A_c سطح ترک است. بنابراین:

$$u_i = \frac{\partial}{\partial P_i}\left[\int_0^{A_c} J dA\right] \qquad (۳-۲)$$

ضریب تأثیر انعطاف پذیری c_{ij} برابر است با:

$$c_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j}\int_0^{A_c} J dA \qquad (۴-۲)$$

بنابراین ماتریس انعطاف پذیری یک ماتریس از مرتبه ۱۲ خواهد بود اگر تمام ۶ درجه آزادی شامل سه درجه آزادی جابجایی و سه درجه دوران برای هر گره المان در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۲: المان تیر با ترک عرضی تحت تأثیر نیروهای اعمالی

رابطه بین J (دانسیته انرژی کرنشی) و ضرایب تمرکز تنش برای اجسام الاستیک خطی توسط رابطه زیر بیان می‌شود[۹]:

$$J = \frac{\beta}{E}K_I^2 + \frac{\beta}{E}K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E}K_{III}^2 \qquad (۵-۲)$$

که در آن ν ضریب پواسن و E مدل الاستیسیته و K_I, K_{II}, K_{III}ضرایب تمرکز تنش برای مدهای اول، دوم و سوم شکست است و βبه صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \begin{cases} 1 & for\ \ plane\ \ stress \\ 1-\nu^2 & for\ \ plane\ \ strain \end{cases}$$