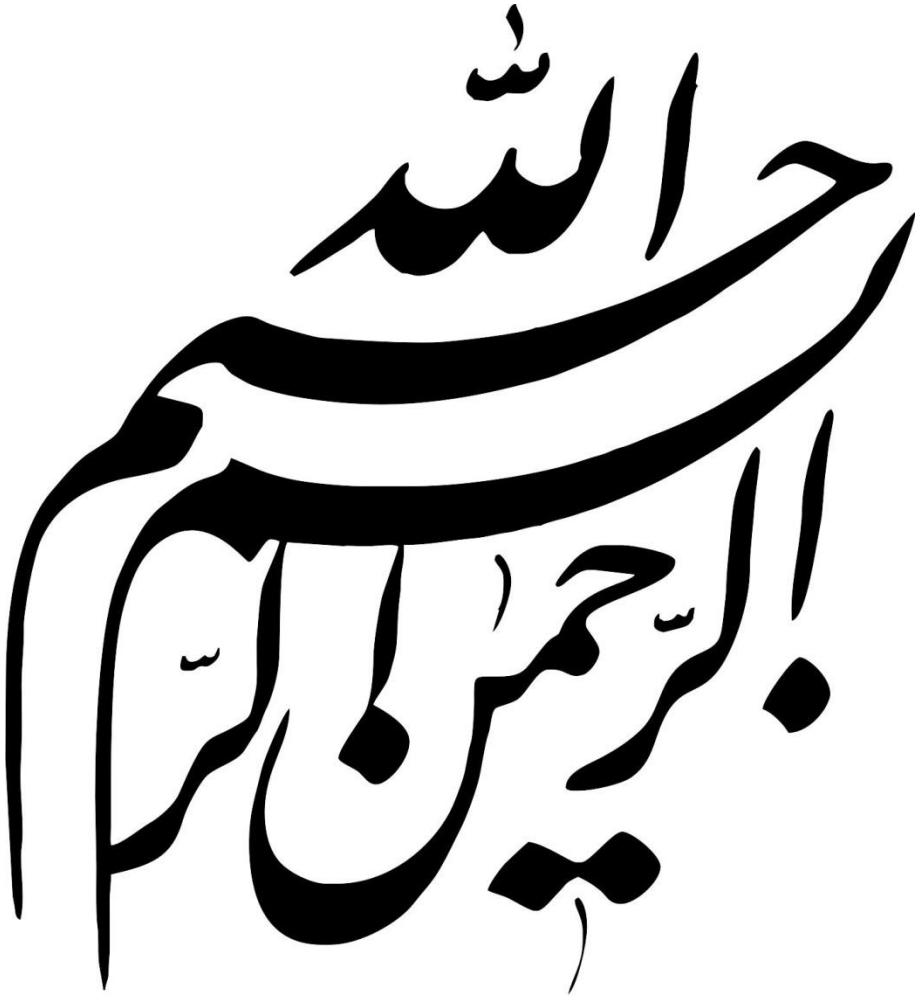
بسم الله
الرحمن الرحیم

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی عمران

گرایش سازه

بررسی رفتار دینامیکی تیر ترک‌خورده تحت بار متحرک

از

سیامک ربیعی

استاد راهنما

دکتر نصرت‌الله فلاح

شهریور ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توکل و تکیه بر او سرانجام تمام امور را نیک می گرداند. در آغاز بر خود لازم می دانم از استاد بزرگوار و گران قدر، آقای **دکتر نصرت ا... فلاح** که در تمامی مراحل انجام این پایان نامه، با راهنمایی و توصیه های ارزشمند خود، راه و مسیر انجام این تحقیق را هموار نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. از اساتید محترم **دکتر بهار** و **دکتر صالح‌جلالی** که قبول زحمت فرموده و امر داوری پایان نامه و بازخوانی آن را بر عهده گرفتند کمال امتنان را دارا می باشم.

بر خود لازم می دانم که از دوست عزیزم جناب **آقای مهندس عمران شادافزا** که در تمامی مراحل انجام این کار یار و یاور من بوده، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

در پایان از **خانواده خود** که همواره در تمامی مراحل تحصیل مشوق و حامی اینجانب بوده اند سپاس گذاری می نمایم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

چکیده فارسی ..... ذ

چکیده انگلیسی ..... ر

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱: مکانیک شکست ۲

۱-۲: ترک ۳

۱-۳: بارهای متحرک ٤

۱-٤: هدف از انجام تحقیق حاضر ۵

۱-۵: مراحل انجام تحقیق حاضر ۵

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته ۸

فصل سوم: تئوری ترک ۲۵

۳-۱: مقدمه ۲٦

۳-۱-۲: مودهای شکست ۲۸

۳-۲: مروری بر تاریخچه‌ی مکانیک شکست ۲۸

۳-۲-۱: مکانیک شکست الاستیک خطی ۲۸

۳-۲-۲: اصلاحات Irwin ۳۱

۳-۲-۳: مفهوم ضریب شدت تنش(SIF) ۳۲

۳-۲-٤: نرخ رهایی انرژی کرنشی ۳٤

۳-۲-٤-۱: مقدمه ۳٤

۳-۲-٤-۲: تعریف نرخ رهایی انرژی کرنشی ۳۵

۳-۲-٤-۳: رابطه بین G و K ۳۷

۳-۲-٤-٤: جمع آثار قوای نتایج G و K ۳۹

۳-۲-٤-۵: روش‌های تعیین نرخ رهایی انرژی کرنشی ٤۰

۳-۲-٤-۵-۱: روش تئوری تیر ٤۰

۳-۲-٤-۵-۲: روش مساحت ٤۰

۳-۲-٤-۵-۳: روش گسترش مجازی ترک ٤٤

۳-۲-٤-۵-٤: روش انتگرال مستقل از مسیر J ٤۵

۳-۲-٤-۵-۵: روش بسته شدن مجازی ترک ٤۸

۳-۳: ضریب انعطاف‌پذیری مد اول ترک ٤۹

۳-٤: روشهای موجود برای مدل‌کردن ترک‌ها ۵۱
۳-٤-۱: مدل فنر پیچشی ۵۱
۳-٤-۲: مدل پیوسته‌ی کاهش سختی تیر ترک‌خورده ۵۳
۳-٤-۳: ارتعاش تیر ترک خورده‌ی ساکن ۵٤
۳-٤-٤: تئوری ارتعاش محوری میله ترک خورده ۵۵
فصل چهارم: معادلات حاکم ۵۷
٤-۱: روش بدست آوردن فرکانس های طبیعی تیر ترک‌خورده ۵۸
٤-۱-۱:روش Myklestad-Prohl ۵۸
٤-۱-۲: ماتریس انتقال ٦۲
٤-۲: تیر مورد بررسی شده در این تحقیق ٦۵
٤-۳: ضریب شدت تنش ٦۸
٤-٤: بدست آوردن بار معادل ۷۰
٤-۵: معادله خیز تیر بدون ترک ۷۳
٤-۵-۱: تحت بار ثابت ۷۳
٤-۵-۲: تحت بار هارمونیک ۷۵
فصل پنجم: نتایج و مطالعات عددی ۷۸
۵-۱: مطالعات عددی ۷۹
۵-۱-۱: بار متحرک با مقدار ثابت ۸۰
۵-۱-۱-۱: تاثیر سرعت عبور بار بر روی ضریب شدت تنش ترک ۸۰
۵-۱-۱-۲: تاثیرعمق ترک بر روی ضریب شدت تنش ترک در سرعت‌های مختلف عبور بار ۸۳
۵-۱-۱-۳: تاثیر موقعیت بار بر روی ضریب شدت تنش ترک در سرعت‌های مختلف عبور بار ۸٦
۵-۱-۱-٤: تاثیر موقعیت بار و ابعاد ترک بر روی ضریب شدت تنش ترک ۸۸
۵-۱-۱-۵: تاثیر سرعت عبور بار در رابطه مکان بار و ابعاد ترک با ضریب شدت تنش ترک ۸۹
۵-۱-۱-٦: تاثیر مکان ترک بر روی ضریب شدت تنش ترک ۹۱
۵-۱-۱-۷: تاثیر بارگذاری بر روی رفتار دینامیکی تیر ترک‌خورده ۹۲
۵-۱-۱-۸: بررسی صحت و دقت مطالعات انجام شده با مقاله Mahmoud(2001) ۹۷
۵-۱-۲: بار هارمونیک متحرک ۹۸
۵-۱-۲-۱: بار هارمونیک متحرک در حالت سرعت و شکل بارگذاری مشخص ۹۸
۵-۱-۲-۱-۱: بار هارمونیک متحرک با شکل بارگذاری نیم سیکلی (n=1) ۱۰۰
۵-۱-۲-۱-۱-۱: تاثیر سرعت و زمان بارگذاری بر روی ضریب شدت تنش ۱۰۰

۵-۱-۲-۱-۱-۲: تاثیر عمق ترک بر روی ضریب شدت تنش..... ۱۰۱
۵-۱-۲-۱-۲: بار هارمونیک متحرک با شکل بارگذاری یک سیکلی (n=2)..... ۱۰۲
۵-۱-۲-۱-۲-۱: تاثیر سرعت و زمان بارگذاری بر روی ضریب شدت تنش..... ۱۰۳
۵-۱-۲-۱-۲-۲: تاثیر عمق ترک بر روی ضریب شدت تنش..... ۱۰۵
۵-۱-۲-۱-۳: بار هارمونیک متحرک با شکل بارگذاری یک و نیم سیکلی (n=3)..... ۱۰۵
۵-۱-۲-۱-٤: بار هارمونیک متحرک با شکل بارگذاری دو سیکلی (n=4)..... ۱۰۸
۵-۱-۲-۱-۵: تاثیر بار هارمونیک متحرک با شکل و سرعت مشخص بر روی رفتار دینامیکی تیر ترک‌خورده..... ۱۱۰
۵-۱-۲-۱-۵-۱: بارگذاری متحرک هارمونیک با شکل و سرعت مشخص در حالت نیم سیکلی(n=1)..... ۱۱۱
۵-۱-۲-۱-۵-۲: بارگذاری متحرک هارمونیک با شکل و سرعت مشخص در حالت یک سیکلی(n=2)..... ۱۱۳
۵-۱-۲-۲: بار هارمونیک متحرک در حالت سرعت و فرکانس مشخص..... ۱۱٦
۵-۲: مدل سازی با نرم افزار Abaqus..... ۱۲۰
۵-۲-۱: نتایج مدل سازی با نرم افزار Abaqus..... ۱۲۳
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۱۲٤
٦-۱: نتیجه‌گیری..... ۱۲۵
٦-۲: پیشنهادات..... ۱۲۷
مراجع ۱۲۸

جداول صفحه

جدول ۵-۱: تاثیر عمق ترک بر روی ضریب شدت تنش در سرعت های مختلف بارگذاری..... ۸٤
جدول ۵-۲: سرعت و فرکانس های بارگذاری برای بار هارمونیک متحرک با شکل نیم سیکلی..... ۱۰۰
جدول۵-۳: سرعت و فرکانس‌های بارگذاری برای بار هارمونیک متحرک با شکل یک سیکلی..... ۱۰۳
جدول ۵-٤: تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده با سرعت بارگذاری و عمق ترک..... ۱۰۵
جدول ۵-۵: سرعت و فرکانس‌های بارگذاری برای بار هارمونیک متحرک با شکل یک و نیم سیکلی..... ۱۰۵
جدول ۵-٦: سرعت و فرکانس‌های بارگذاری برای بار هارمونیک متحرک با شکل یک و نیم سیکلی..... ۱۰۸

شکل صفحه

شکل ۳-۱: مودهای اساسی گسترش ترک(a) مود باز،(b) مود لغزش، (c) مود پارگی ۲۷

شکل ۳-۲: یک ترک سطحی با طول a ۲۹

شکل ۳-۳: ناحیه‌ی پلاستیک در اطراف تیپ ترک در مصالح انعطاف‌پذیر ۳۱

شکل ۳-٤: ترک‌ها با بارگذاری‌های متفاوت و ضریب شدت تنش متناظر ۳۳

شکل ۳- ۵: ترک در یک جسم دلخواه ۳٦

شکل ۳- ٦: جابجایی نوک ترک ۳۷

شکل ۳- ۷: ترک در قسمتی از یک قطعه ترک‌دار ٤۰

شکل ۳- ۸: معیار گریفیث برای تغییر مکان ثابت- ورق ترک دار با لبه‌های ثابت ٤۱

شکل ۳- ۹: یک صفحه ترک‌دار تحت بار کششی ٤۲

شکل ۳- ۱۰: منحنی بار - جابجایی ٤۳

شکل ۳- ۱۱: ترک در یک جسم دلخواه قبل و بعد از رشد ٤٦

شکل ۳- ۱۲: منحنی بسته دلخواه حول نوک ترک ٤۷

شکل ۳- ۱۳: یک مسیر بسته دلخواه حول نوک ترک ٤۷

شکل ۳- ۱٤: سطح ترک در یک مقطع مستطیلی، ناحیه‌ی بدون هاشور ٤۹

شکل ۳- ۱۵: مدل فنر پیچشی ترک ۵۲

شکل ۳- ۱٦: ترک در یک تیر ساده ۵۳

شکل ۳- ۱۷: تغییرات در سختی تیر برای روشهای ارائه شده توسط Christides وBarr(۱۹۸٤) (خط ممتد) و Sinha et al (۲۰۰۲)(خط چین) ، برای ترک با عمق نسبی ۵٪ واقع در $x=0$ ۵٤

شکل ٤-۱: بردارهای وضعیت، نیرو و تغییرمکان‌های تعمیم یافته ۵۸

شکل ٤-۲: ارائه مدل اجزا محدود یک سازه ٦۲

شکل ٤-۳: استخراج ماتریس انتقال یک تیر ٦۳

شکل ٤-٤: تقسیم تیر به n المان و نحوه ی شماره‌گذاری گره‌ها ٦۵

شکل ٤- ۵: المان تیپ در روش Myklestad برای محاسبه فرکانس‌ها و مود شکل‌ها ٦۵

شکل ٤- ٦: تیر ترک‌خورده تحت اثر بارگذاری دینامیکی ٦۹

شکل ٤-۷: (a)تیر ترک‌خورده تحت اثر بارگذاری دینامیکی(b) مدل شبیه سازی و تقسیم تیر به n قطعه (c) مدل شبیه سازی شده توزیع بار معادل در زمان مشخص t_n در گره‌های مختلف ٦۹

شکل ۵-۱: تیر ترک‌خورده تحت اثر بارگذاری دینامیکی ۷۹

شکل ۵-۲: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت عبور بار وموقعیت بار، $\frac{a}{h}=0.5$ ۸۱

شکل ۵-۳: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری، $\frac{a}{h}=0.3$ ۸۲
شکل ۵-٤: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری، $\frac{a}{h}=0.1$ ۸۲
شکل ۵- ۵: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده با سرعت و ابعاد ترک مختلف، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $\frac{\xi}{L}=0.5$ ۸٤
شکل ۵- ٦: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده با سرعت و ابعاد ترک مختلف، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $\frac{\xi}{L}=0.7$ ۸۵
شکل ۵- ۷: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده با سرعت و ابعاد ترک مختلف، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $\frac{\xi}{L}=0.9$ ۸۵
شکل ۵- ۸: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و موقعیت بار، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $\frac{a}{h}=0.2$ ۸٦
شکل ۵- ۹: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و موقعیت بار ، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $\frac{a}{h}=0.4$ ۸۷
شکل ۵- ۱۰: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و موقعیت بار ، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $\frac{a}{h}=0.6$ ۸۷
شکل۵- ۱۱: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به ابعاد ترک و مکان بارگذاری، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $v=30\ m/s$ ...۸۸
شکل ۵- ۱۲: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به ابعاد ترک و موقعیت بار، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $v=50\ m/s$ ۸۹
شکل ۵- ۱۳: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به ابعاد ترک و موقعیت بار، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $v=70\ m/s$ ۹۰
شکل ۵- ۱٤: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به ابعاد ترک و موقعیت بار، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ، $v=100\ m/s$ ۹۰
شکل ۵- ۱۵: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به مکان ترک و بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.6$ ۹۱
شکل ۵- ۱٦: اثر ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه برای سرعت‌های مختلف ، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ۹۳
شکل ۵- ۱۷: اثر عمق ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه، $\frac{L_c}{L}=0.5$، $v=30\ m/s$ ۹٤
شکل ۵- ۱۸: اثر عمق ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه، $\frac{L_c}{L}=0.6$، $v=30\ m/s$ ۹٤
شکل ۵- ۱۹: اثر عمق ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه، $\frac{L_c}{L}=0.5$، $v=60\ m/s$ ۹۵
شکل ۵- ۲۰: اثر عمق ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه، $\frac{L_c}{L}=0.6$، $v=60\ m/s$ ۹۵
شکل ۵- ۲۱: مقایسه نتایج مطالعه انجام شده با نتایج مقاله Mahmoud(2001)..... ۹۷
شکل ۵- ۲۲: چهار الگوی بارگذاری هارمونیک..... ۹۹
شکل ۵- ۲۳: بارگذاری نیم سیکلی (نیم سینوسی)..... ۱۰۰
شکل ۵- ۲٤: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.5$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۱
شکل ۵- ۲۵: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.4$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۱
شکل ۵- ۲٦: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.2$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۲
شکل ۵- ۲۷: بارگذاری یک سیکلی (n=2)..... ۱۰۲
شکل ۵- ۲۸: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.5$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۳
شکل ۵- ۲۹: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.4$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰٤
شکل ۵- ۳۰: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.2$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰٤
شکل ۵- ۳۱: بارگذاری یک و نیم سیکلی (n=3)..... ۱۰۵

شکل ۵- ۳۲: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.2$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۶
شکل ۵- ۳۳: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.4$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۷
شکل ۵- ۳٤: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.2$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۷
شکل ۵- ۳۵: بارگذاری دو سیکلی (n=4)..... ۱۰۸
شکل ۵- ۳٦: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری ، $\frac{a}{h}=0.5$ ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ۱۰۸
شکل ۵- ۳۷: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری در $\frac{a}{h}$ های متفاوت ، $\frac{L}{L_c}=0.5$ ... ۱۰۹
شکل ۵- ۳۸: بارگذاری با شکل و سرعت مشخص در حالت‌های (۱) n=1 (۲) n=2..... ۱۱۰
شکل ۵- ۳۹: اثر ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه برای سرعت‌های مختلف تحت بارگذاری هارمونیک،n=1 ، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ۱۱۲
شکل ۵- ٤۰: اثر عمق ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه، n=1، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ،$v=20\ m/s$ ۱۱۳
شکل ۵- ٤۱: اثر ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه برای سرعت های مختلف تحت بارگذاری هارمونیک،n=2 ، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ۱۱۳
شکل ۵- ٤۲: اثر عمق ترک بر روی پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه ، n=2، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ،$v=20\ m/s$ ۱۱۵
شکل ۵- ٤۳: بار هارمونیک متحرک به صورت بارگذاری سینوسی..... ۱۱٦
شکل ۵- ٤٤: تغییرات بارگذاری هارمونیک متحرک در سرعت های مختلف در فرکانس۵=Ω..... ۱۱۷
شکل ۵- ٤۵: نحوه تغییرات ضریب شدت تنش نرمالایز شده به سرعت و زمان بارگذاری، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ،$\frac{a}{h}=0.5$ ۱۱۹
شکل ۵- ٤٦: نمونه ای از تیر مدل شده..... ۱۲۰
شکل ۵- ٤۷: نقاط تکیه‌گاهی..... ۱۲۰
شکل ۵- ٤۸: شکاف ایجاد شده در تیر به عنوان ترک..... ۱۲۰
شکل ۵- ٤۹: تعریف ترک..... ۱۲۱
شکل ۵- ۵۰: مش بندی خاص اطراف نوک ترک..... ۱۲۱
شکل ۵- ۵۱: تغییر شکل تیر بعد از بارگذاری..... ۱۲۲
شکل ۵- ۵۲: تمرکز تنش و بازشدگی ترک..... ۱۲۲
شکل ۵- ۵۳: تنش در اطراف نوک ترک..... ۱۲۲
شکل ۵- ۵٤: مقایسه نتایج ضریب شدت تنش نرمالایز شده بر حسب عمق ترک‌های مختلف و مکان‌های متفاوت بار در دو نرم‌افزار Matlab و Abaqus ، $\frac{L_c}{L}=0.5$ ۱۲۳

چکیده

رفتار تیرهای ترک‌خورده تحت بارهای متحرک

سیامک ربیعی

تیرها یکی از مهمترین اجزای سازه‌ای هستند که به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های بسیاری به مطالعه ی تاثیر بارهای متحرک بر روی رفتار دینامیکی تیرها اختصاص یافته است. از طرفی تاثیر ترک بر روی رفتار دینامیکی تیر نیز توجه بسیاری را به علت اهمیت موضوع در حوزه مهندسی عمران و مکانیک به خود جلب کرده است. در بسیاری از مسائل مهندسی، گسترش ترک ناشی از پدیده‌ی خستگی و شکست ترد از نگرانی‌های مهم می‌باشد.

ضریب شدت تنش (SIF) یک شاخصی از ترک می‌باشد که شدت تنش در محدوده‌ی ترک را مشخص می‌کند. در سیستم الاستیک خطی، سازه ها بوسیله ضریب شدت تنش برای ترک های موجود یا فرضی بررسی و کنترل می‌شوند. اثر ضریب شدت تنش زمانی که تیر تحت بار متحرک قرار می‌گیرد، شدیدتر می‌شود.

بارهای متحرک تغییرمکان‌ها و تنش‌های بزرگتری نسبت به بارهای استاتیکی ایجاد می‌کنند. این مسئله برای تیر سالم و بدون ترک بصورت گسترده بررسی شده در صورتی که در تیرهای ترک دار این مطالعات کمتر بوده ولی بسرعت در حال گسترش می‌باشد. وجود ترک بر روی خواص مکانیکی و مقاومت تیر نیز اثر می‌گذارد به خصوص اگر تیر تحت بار متحرک باشد. از انواع بارهای متحرک که بسیار حائز اهمیت می‌باشند، بار متحرک با مقدار ثابت و هارمونیک می‌باشند.

در این رساله اثر بار متحرک با مقدار ثابت و هارمونیک بر روی ضریب شدت تنش(SIF) برای ترک لبه ایی یگانه در یک تیر اویلر- برنولی فاقد میرایی با شرایط تکیه گاهی ساده مورد بررسی قرار گرفته است. وجود ترک در تیر یک انعطاف پذیری موضعی ایجاد می‌کند که باعث تغییر در رفتار دینامیکی تیر می‌شود. برای بدست آوردن بار معادل روی تیر از روش آنالیز مودال و برای محاسبه ضریب شدت تنش از روشی مبتنی بر مکانیک شکست با فرض رفتار الاستیک خطی استفاده شده است. تاثیرات مکان بار، اندازه ترک، مدت زمان بارگذاری، سرعت و فرکانس بار متحرک بر روی مقدار SIF مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده‌ی این می‌باشد که ضریب شدت تنش تابعی از زمان، سرعت و فرکانس بار متحرک و مکان و اندازه ترک می‌باشد.

کلیدواژه: ضریب شدت تنش(SIF)، تیر ترک‌خورده، بار متحرک با مقدار ثابت، بار متحرک هارمونیک، ارتعاش

Abstract

Behaviour of Carcked Beams Under Moving Loads

Siamak Rabiee

Beam type structures are one of the most important structural systems which have been studied intensively. Many researches have been devoted to the study of the effects of moving loads on the dynamic behavior of beams. On the other hand, the effect of cracks on the dynamic behavior of beams has received much attention because of its importance in both mechanical and civil engineering applications. Brittle fracture and fatigue crack propagation are of important concerns in many engineering applications.

Stress intensity factor (SIF) is a parameter of the crack which denotes the intense of stress at the cracked zone. Structures, in the linear elastic regime, should be checked using the SIF for existing or assumed cracks. The effect of the SIF is more intense when the beam is subjected to a moving load.

Moving loads cause larger displacements and higher stresses than static loads in structures. This problem has received substantial attention in the literature for uncracked beams. However the studies for cracked beams are few but there has been growing interest in studying the vibration of cracked beams. The presence of cracks affects the mechanical behavior and also the strength of beams especially in cases in which beams are subjected to a moving load. One type of the moving loads which are more important in the engineering applications are concentrated moving load with constant and harmonic magnitude.

In this study the effects of moving load on the stress intensity factor (SIF) for the single edge crack in a simply supported undamped Euler-Bernoulli beam are investigated. The presence of cracks in a beam introduces local flexibility and therefore changes the dynamic response of the beam. The approach is based on using modal analysis to determine the equivalent load on the beam, then linear elastic fracture mechanics is used to calculate stress intensity factors (SIF).

The effects of the loading duration, frequency and the speed of the moving load and also the location and size of the crack on the SIF are also studied.

Keywords*:* stress intensity factor (SIF), cracked beam, harmonic moving load, concentrated moving load with constant magnitude, vibration

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مکانیک شکست[1]

ترک در کلیه سازه‌ها و قطعات ماشین‌آلات می‌تواند ایجاد شود که بعضی از آنها ممکن است داخلی بوده و با چشم دیده نشود. این ترک‌ها می‌توانند در حین تولید و یا بهره‌برداری بوجود آمده باشند که با توجه به شرایط کارکرد قطعه و المان‌های سازه‌ای، اندازه ترک و جنس قطعه، ممکن است که ترک‌های بحرانی باشند. ترک‌ها می‌توانند از این شکاف‌ها و ناپیوستگی‌ها شروع به رشد کرده و موجب گسیختگی قطعه و نهایتاً از کار افتادگی سازه شوند. بنابراین مهمترین هدف علم مکانیک شکست، محاسبه میزان حساسیت قطعه به ترک و اندازه بحرانی ترک است که می‌تواند سبب شکست ناگهانی در هنگام بارگذاری شود. بحث‌های مرتبط به بحرانی بودن ترک‌ها و رشد احتمالی آنها در حیطه‌ی علم مکانیک شکست قرار دارند.

علم مکانیک شکست از اوایل قرن اخیر پایه‌گذاری شده و تا به امروز بسط و گسترش فراوانی یافته است. از عوامل مهمی که باعث توجه به این شاخه از علم گردید، حوادث و سوانحی بوده که در اثر واماندگی یک جزء از یک سازه و یا یک قطعه از مجموعه رخ می‌داد و منجر به واماندگی[2] و تخریب کل مجموعه می‌گردید که بعضاً علاوه بر خسارت مالی، تلفات جانی نیز در برداشت.

علم مکانیک شکست در حوزه‌هایی که روابط مقاومت مصالح جوابگو نیست راه‌حل‌های قابل قبولی برای تحلیل ارائه می‌دهد. معیارهای سنتی طراحی مهندسی که بر مبنای مقاومت کششی، مقاومت تسلیم و نیروی کمانش قرار دارند و برای بسیاری از سازه‌های مهندسی جوابگو هستند، در جایی که احتمال ترک وجود دارد فاقد کارایی هستند. از عوامل موثر در توجه به علم مکانیک شکست، وقوع شکست در موارد با استحکام بالا و تحت تنش‌های پایین می‌باشد. پدیده‌ای که روابط مقاومت مصالح قادر به توجیه آن نبودند. امروزه پس از گذشت چندین دهه از عمر مکانیک شکست، این علم به ابزاری کارآمد و مفید در طراحی‌ها بویژه آن دسته از طراحی‌هایی که با مواد با استحکام بالا سروکار دارند، تبدیل شده است.

[1] Fracture Mechanic
[2] Failure

۱-۲- ترک[3]

تیر ها یکی از مهمترین اجزای سازه ای هستند که به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته اند. پژوهش های بسیاری به مطالعه‌ی تاثیر بارهای متحرک بر روی رفتار دینامیکی تیر اختصاص یافته است. از طرفی تاثیر ترک بر روی رفتار دینامیکی تیر نیز توجه بسیاری را به علت اهمیت موضوع در حوزه مهندسی عمران و مکانیک به خود جلب کرده است. در بسیاری از مسائل مهندسی، گسترش ترک ناشی از پدیده ی خستگی و شکست ترد از نگرانی‌های مهم می‌باشد.

پیامدهای ناشی از شکست سازه ها در اثر وجود ترک در اعضای آنها می‌تواند باعث خسارات جانی و مالی گسترده و جبران ناپذیری گردد. پل ها، مخازن، بدنه کشتی ها، خطوط راه آهن، نیروگاه های اتمی، قطعات مختلف هواپیما، بدنه و سازه‌هایی که در صنایع هوا فضا کاربرد دارند از جمله دیگر سازه‌هایی هستند که ترک در آنها بسیار تأثیرگذار است. معیارهای سنتی و متداول شکست سازه‌ها که مبتنی بر مقاومت نهایی مصالح می‌باشند، غالباً قادر نیستند به طور کامل اکثر موارد شکست سازه‌ای را که در تنش‌های خیلی کمتر از مقاومت نهایی مواد اتفاق می‌افتد توجیه کنند. به عبارت دیگر این طور می‌توان گفت که وجود ترک باعث کاهش مقاومت نهایی و در نتیجه گسیختگی مواد در تنش‌هایی کمتر از تنش‌های مجاز می‌شود. اهمیت موضوع به گونه‌ایست که محققین زیادی در سراسر دنیا همچنان موضوع ترک را به روش‌های مختلفی بررسی می‌کنند تا درک عمیق‌تر و بیشتری نسبت به آن حاصل شود.

در سیستم الاستیک خطی، سازه‌ها بوسیله ضریب شدت تنش[4] برای ترک‌های موجود یا فرضی بررسی و کنترل می‌شوند. ضریب شدت تنش(SIF) یک شاخصی از ترک می‌باشد که شدت تنش در محدوده‌ی ترک را مشخص می‌کند. از مواردی که بر روی ضریب شدت تنش اثر می‌گذارد، شرایط بارگذاری می‌باشد. اثر ضریب شدت تنش زمانی که تیر تحت بار متحرک قرار می‌گیرد شدیدتر می‌شود زیرا بارهای متحرک تغییرمکان ها و تنش‌های بزرگتری نسبت به بارهای استاتیکی تولید می‌کنند. این مسئله برای تیر سالم و بدون ترک بصورت گسترده بررسی شده در صورتیکه در تیرهای ترک‌دار این مطالعات کمتر بوده ولی بسرعت در حال گسترش می‌باشد. وجود ترک بر روی خواص مکانیکی و مقاومت تیر نیز اثر می‌گذارد. از انواع بارهای متحرک که بسیار حائز اهمیت می‌باشند بار متحرک متمرکز با مقدار ثابت و هارمونیک می‌باشد.

[3] Crack
[4] Stress Intensity Factor

ترک در سازه ها در اثر عوامل متعددی مانند مقاومت پایین سازه در مقابل پدیده خستگی ناشی از بارهای سرویس، بوجود می‌آید و شکست ترد و انتشار ترک جزء موارد بسیار مهم در علوم مهندسی می‌باشند. وجود ترک علاوه بر آنکه مشخصات دینامیکی و مقاومت کمانشی تیر را تغییر می‌دهد، موجب تغییر در رفتار تیر تحت بار متحرک نیز می‌شود.

۱-۳- بارهای متحرک[5]

یکی از مسائل مهم در ارتباط با عملکرد سازه‌هایی مثل پل‌ها، تاثیر بارهای متحرک بر روی آنها می‌باشد. بارهای متحرک سبب ایجاد تغییرمکان‌ها و تنش‌های بزرگتری نسبت به بارهای استاتیکی در سازه‌ها می‌شوند، به طوریکه این تغییرمکان‌ها و تنش‌ها تابعی از پارامتر زمان و سرعت بار متحرک می‌باشند. بررسی این مسئله در تیرهای غیر ترک‌خورده مورد توجه بسیار قرار گرفته است، همچنین کمتر از دو دهه است تحقیق‌هایی توسط پژوهشگران بر روی تاثیر بارهای متحرک بر روی تیرهای ترک‌خورده در حال انجام است.

یکی از مسائل مهم پیش روی مهندسین سازه، بررسی تاثیرات دینامیکی بارها و جرم‌های متحرک برروی سیستم‌های سازه‌ای است .مسئله فوق درسالیان اخیر به صورت تئوریک و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. این مسئله پیچیدگی خاص خود را دارد زیرا بار اندرکنشی در زمان و فضا متغییر است. حرکت قطارها وماشین‌های سنگین برروی پل ها، حرکت قطار بر روی ریل، جرثقیل‌های صنعتی متحرک روی تیر همه نمونه‌هایی از این مسائل هستند. در سال‌های اخیر، افزایش چشمگیر سرعت حرکت قطارهای مسافرتی باعث رویکرد مجدد محققین به مسئله‌های اندرکنش پل و وسیله نقلیه شده است.

درصورتی که در مدلسازی مسئله از اثرات لختی جرم متحرک صرف نظر شود مسئله بار متحرک نامیده میشود، با در نظر گرفتن اثرات لختی جرم متحرک مسئله بار متحرک تبدیل به مسئله جرم متحرک می‌شود. بیشتر این سازه‌ها درتحقیقات انجام شده در زمینه اندرکنش پل‌ها و وسایل نقلیه به صورت تیر اویلر–برنولی مدلسازی می‌شوند و در آنها از اثرات تغییرشکل‌های برشی و اینرسی دورانی و اینرسی جرم متحرک در تیر، صرف نظر می‌شود. فرضیات تیر اویلر–برنولی برای تیرهایی که نسبت طول دهانه آزاد به ارتفاع آنها بیشتر از ۱۰ باشد دقت خوبی دارد اما درصورتی که نسبت مذکور از ۱۰ کمتر باشد، اختلاف نتایج تجربی با نتایج حاصل از تئوری برنولی محسوس می‌شود.

[5] Moving Loads

۱-٤- هدف از انجام تحقیق حاضر

از میان تمامی خرابی‌ها، ترک‌ها بیشترین نوع خرابی می‌باشند که در سازه‌ها رخ می‌دهند. از طرفی وجود ترک در سازه‌های تحت بارگذاری دینامیکی می‌تواند بسیار خطرناک باشد، بنابراین مطالعه‌ی ترک‌ها و تاثیر آنها در خواص دینامیکی سازه‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. وجود ترک می‌تواند تاثیر بسیار زیادی بر روی رفتار دینامیکی کل سازه داشته باشد و نمی‌توان آن را تنها به عنوان یک تغییر موضعی در سختی سازه به شمار آورد، از سویی عبور بار متحرک به علت اثرات دینامیکی آن و تولید تغییرشکل‌ها و تنش‌های بزرگتری نسبت به بارهای استاتیکی همواره مورد توجه محققین بوده است. بررسی همزمان پارامترهای ترک تحت بارگذاری متحرک، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اهمیت مطالعه‌ی ترک‌ها از این جهت بیشتر به نظر می‌رسد، که بر اساس تحقیقی که Dimarogonas در ارتباط با مقالات مرتبط در این زمینه انجام داده است تنها از سال ۱۹۷۱ تا ۱۹۹٦ بیش از ۵۰۰ مقاله در این زمینه در نشریات علمی به چاپ رسیده است.

۱-۵- مراحل انجام تحقیق حاضر

در تحقیق حاضر رفتار دینامیکی تیر ترک‌خورده تحت بار متحرک مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای ضریب شدت تنش و پاسخ زمانی خیز در وسط دهانه تحت بارگذاری های متحرک ثابت و هارمونیک محاسبه شده است.

در انجام مراحل مختلف تحقیق حاضر نیاز به برنامه‌نویسی با یک نرم‌افزار کدنویسی احساس می‌شد، از اینرو استفاده از نرم‌افزار Matlab نقش بسزایی در پیشبرد این تحقیق داشته است. برای بررسی صحت و دقت مطالعه صورت گرفته نیاز به شبیه‌سازی یک آزمایش به کمک نرم افزار اجزاء محدود ضروری به نظر می‌رسید که به این منظور نرم افزار Abaqus مورد استفاده قرار گرفته است.

این پایان‌نامه در شش فصل ارائه می‌شود. در نگارش فصول سعی شده است تا حد ممکن، مطالب به صورت کامل و در عین حال روان و مختصر بیان شوند. فصول مختلف این تحقیق به طور خلاصه موارد زیر را پوشش می‌دهند:

در فصل اول پس از ارائه‌ی مقدماتی در ارتباط با مفاهیمی از قبیل مکانیک شکست، ترک و بارهای متحرک، اهمیت لزوم پرداختن به این مقوله در مهندسی سازه مورد بررسی قرار گرفت، در نهایت روند پیشرفت مطالعه‌ی حاضر و ابزارهای علمی مورد نیاز برای آن ارائه شد.

در فصل دوم مروری بر روی مطالعات انجام شده در زمینه تئوری ترک که شامل بررسی‌های تاثیر ترک بر روی مشخصات دینامیکی تیر، تشخیص عمق و محل ترک و ضریب شدت تنش می‌باشد صورت گرفته و همچنین اثر بارهای متحرک بر روی تیرهای بدون ترک و تیرهای ترک خورده بررسی شده است.

در فصل سوم پس از ارائه‌ی مقدماتی درباره انواع ترک در تیرها و تاریخچه‌ی مکانیک شکست و مطالعات انجام شده در این زمینه، مکانیک شکست الاستیک خطی مورد بررسی قرار گرفت و روش‌های بدست آوردن نرخ رهایی انرژی کرنشی که بر-پایه آن ضریب شدت تنش بدست می‌آید به اختصار بیان گردید. در ادامه به ارائه‌ی روشهایی که در مقالات علمی برای مدل کردن ترک‌ها آمده است پرداخته شده است تا بوسیله آنها ضریب انعطاف‌پذیری ترک بدست آید. پس از مطالعه‌ی این فصل خواننده درمی‌یابد که بطور کلی دو مدل برای ترک وجود دارد، در مدل اول که معمولاً بر اساس تئوری‌های مکانیک شکست بیان می‌شود، ترک بصورت یک فنر پیچشی متمرکز مدل می‌شود که دارای سختی مشخص و ثابتی می‌باشد که میزان آن تنها تابعی از هندسه‌ی مقطع تیر و هندسه‌ی ترک می‌باشد. در مدل دوم اثر ترک به صورت کاهش سختی پیوسته در کل تیر دیده می‌شود که بر اساس مشاهدات تجربی می‌باشد.

در فصل چهارم توضیحاتی در مورد معادلات بکار رفته در این تحقیق ارائه می‌گردد که شامل محاسبه فرکانس‌های طبیعی تیر ترک‌خورده از روش Myklestad، بار معادل ناشی از بار متحرک از روش آنالیز مودال و ضریب شدت تنش از روابط مکانیک شکست الاستیک خطی می باشد. همچنین برای بررسی رفتار دینامیکی تیر ترک‌خورده و مقایسه آن با تیر سالم، معادلات خیز تیر سالم تحت بار متحرک ثابت و هارمونیک استخراج گردیده است.

فصل پنجم به مطالعات عددی روش ارائه شده در این پایان نامه اختصاص دارد و به دو بخش تفکیک شده است. در بخش اول ضریب شدت تنش ترک و پاسخ زمانی خیز وسط دهانه در شرایط بارگذاری بار متحرک با مقدار ثابت در سرعت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است و در بخش دوم ضریب شدت تنش ترک و پاسخ زمانی خیز وسط دهانه در شرایط بارگذاری بار متحرک هارمونیک محاسبه و ارائه شده است. تاثیر تغییرات زمان و سرعت بارگذاری، اندازه و محل ترک و مکان بار، فرکانس بارگذاری بر روی ضریب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک مدل از یک تیر ترک

خورده در حالت تنش مسطح کدنویسی شده در نرم‌افزار Matlab و یک مدل دو بعدی از تیر ترک خورده در محیط نرم‌افزار Abaqus مورد مطالعه قرار گرفته است.

در نهایت در فصل ششم به نتیجه‌گیری از مشاهدات انجام شده پرداخته و پیشنهاداتی نیز برای ادامه‌ی کار ارائه شده است.