

روزنامه صفا

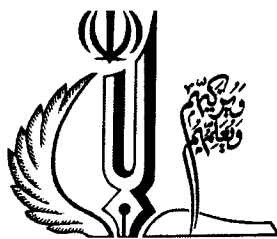
دفتر صحافی مبارک

مرکز تخصصی صحافی پیمان نامہ

تبریز: فلک دانشگاه پاساژ نسیم، زیروزمین پلاک ۲۶ تلفن: ۳۳۶۴۸۰

مدیریت: ۰۹۱۴۱۱۵۰۰۴۹ مدیر اجرائی: ۰۹۱۴۳۱۰۰۰۴۸

۱۴۴۲۲۹ - ۲۰۲۱۷۱۱



دانشگاه شاهرود

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

## رساله

برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

## عنوان

توسعه تحلیل ارتعاشات عرضی سازه‌های ترک‌دار با مدل غیرخطی ترک

استاد راهنما

دکتر موسی رضائی

استاد مشاور

دکتر محمدعلی جعفری‌زاده

۱۳۸۹ / ۸ / ۲

۲

پژوهشگر

رضا حسن‌نژاد

تیر ماه ۱۳۸۹

تصدیق استادیار  
مستاد

۱۴۴۲۲۹

تقديم به

مادر و پدر عزيزم

## تقدیر و تشکر

بدین وسیله بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات استاد محترم راهنما جناب آقای دکتر موسی رضائی به خاطر رهنمودهای ارزنده علمی و اخلاقی‌شان در طول مدت تحصیل، استاد مشاور گرامی جناب آقای دکتر محمدعلی جعفری‌زاده به خاطر مشاوره‌های ارزشمندشان، دکتر تاج‌بخش نوید و دکتر میرمحمد اتفاق به دلیل همکاری صمیمانه‌شان در طی انجام تست‌های تجربی، دوستان و دانشجویان عزیز دکترای دانشکده مهندسی مکانیک به خاطر دلگرمی و مساعدت‌های صمیمی‌شان و کلیه آشنایانی که به هر نحوی مرا در انجام این پایان‌نامه یاری رسانده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

رضا حسن‌نژاد

نام خانوادگی دانشجو: حسن نژاد قدیم

نام: رضا

عنوان پایان نامه: توسعه تحلیل ارتعاشات عرضی سازه‌های ترک‌دار با مدل غیرخطی ترک

استاد راهنما: دکتر موسی رضائی

استاد مشاور: دکتر محمدعلی جعفری‌زاده

مقطع تحصیلی: دکتری رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: دانشگاه تبریز

دانشکده: فنی مهندسی مکانیک تاریخ فارغ التحصیلی: ۸۹/۴/۳۱ تعداد صفحه: ۱۸۵

کلید واژه‌ها: تیر ترک‌دار، ورق ترک‌دار، ترک خستگی غیرخطی، ارتعاشات آزاد میرا، سفتی موضعی وابسته به دامنه، شکل مود وابسته به زمان، حل مجانبی، روش اغتشاشات، سوپر هارمونیک

#### چکیده:

یکی از مسائل مهم موجود در سازه‌ها ایجاد ترک و شکست خستگی آنها ناشی از بارهای دینامیکی می‌باشد. از این رو مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌های ترک‌دار و مدل‌سازی ترک در آنها مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است. تحقیقاتی که تاکنون در زمینه مطالعه رفتار ارتعاشات عرضی سازه‌های ترک‌دار انجام گرفته است عمدتاً مبتنی بر مدل‌های خطی بوده است. برای نشان دادن اثر بسته شدن ترک، برخی از محققان از مدل‌های دوخطی استفاده کرده‌اند با این فرض که ترک در مدت ارتعاش تیر به صورت آنی باز و بسته می‌شود. همچنین در راستای ارائه مدل واقع‌بینانه‌ای از ارتعاش عرضی سازه ترک‌دار محققان دیگری تغییرات پیوسته سفتی تیر در هنگام باز و بسته شدن ترک را شبیه‌سازی کرده‌اند. در این حالت تغییرات سفتی تیر در ارتعاشات اجباری بین دو مقدار سفتی متناظر با ترک کاملاً باز و تیر سالم در نظر گرفته شده است. چنین مدل‌هایی به دلیل در نظر نگرفتن اثر دامنه ارتعاش بر میزان باز و بسته شدن ترک دقت بالایی در آنالیز ارتعاشات آزاد سازه ندارند.

در رساله حاضر روش جدید و کامل‌تری جهت مطالعه و آنالیز ارتعاشات عرضی سازه‌های ترک‌دار با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی ترک ارائه شده است. در این رساله ابتدا برای مدل گسسته موجود در ادبیات فن، با استفاده از تئوری اغتشاشات حل تحلیلی ارائه شده است به نحوی که بتوان با استفاده از آن افزایش میرایی سیستم ناشی از وجود ترک را تخمین زد. همچنین این مدل برای آنالیز ارتعاشات ورق ترک‌دار نیز تعمیم داده شده است. سپس برای آنالیز دقیق‌تر ارتعاشات آزاد سازه، مدل مذکور بهبود داده شده است به نحوی که در آن اثر تغییر دامنه ارتعاش بر میزان باز و بسته شدن ترک منظور شده است.

در مرحله بعد، به منظور بالا بردن دقت مدل گسسته، تیر ترک‌دار به صورت یک سیستم پیوسته در نظر گرفته شده است و ترک به صورت ترک خستگی و با رفتار باز و بسته شدن مدل شده است به نحوی که سفتی سازه در مدت ارتعاش دارای تغییرات پیوسته و تدریجی است. با استناد به نتایج تجربی نشان داده شده است که سفتی تیر در محل ترک بین دو مقدار متناظر با حالت بسته شدن و باز شدن کامل ترک تغییر می‌کند. روش ارائه شده امکان بدست آوردن پاسخ دینامیکی سیستم به صورت تحلیلی را فراهم می‌سازد. همچنین برای مدل کردن دقیق ارتعاشات آزاد سازه ترک‌دار مدلی جدید برای نشان دادن تغییرات سفتی موضعی در محل ترک در مدت ارتعاش سازه ارائه شده است که در مدل مذکور سفتی موضعی در محل ترک به صورت تابعی غیرخطی از دامنه ارتعاش تیر در نظر گرفته شده است، طوری که با تغییر دامنه تیر برحسب زمان، سفتی آن تغییر یافته و موجب تغییر پیوسته فرکانس و شکل مود تیر برحسب زمان و دامنه می‌شود. علاوه بر این برای پیش‌بینی تغییرات ممان خمشی در محل ترک در طی ارتعاش سازه، روشی تحلیلی بر پایه مدل پیوسته در نوسانات کم دامنه سازه ترک‌دار ارائه شده است که امکان محاسبه و پیش‌بینی تغییرات غیرخطی ممان خمشی در محل ترک ناشی از باز

و بسته شدن آن را فراهم می‌آورد. در روش یاد شده، وابستگی فرکانس طبیعی سازه ترک‌دار به دامنه ارتعاشات به صورت تحلیلی نشان داده شده است.

مقایسه نتایج حاصل از تئوری با نتایج تست‌های تجربی نشان می‌دهد که در بین مدل‌های گسسته و پیوسته، مدل جدید ارائه شده بر پایه روش بالانس انرژی مکانیکی که در آن تغییرات سفتی در محل ترک، میرایی سازه‌ای و اثر میرایی در محل ترک، در نظر گرفته شده است دارای دقت بالاتری می‌باشد. صحت و دقت روش ارائه شده در این رساله با انجام تست‌های تجربی متعدد و مقایسه با نتایج موجود در ادبیات فن به اثبات رسیده است.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه و بیان مسأله	۱
۲-۱- مفروضات و تعاریف مسأله	۴
۱-۲-۱- تیر	۴
۱-۲-۲- ورق	۴
۱-۲-۳- عیب	۵
۱-۲-۴- ترک بسته شونده	۵
۱-۲-۵- مدل خطی ترک (مدل باز ترک)	۵
۱-۲-۶- مدل غیرخطی ترک	۶
۱-۲-۶-۱- مدل دوخطی ترک	۶
۱-۲-۶-۲- مدل ترک خستگی	۶
۲- فصل دوم: مفاهیم اولیه و بررسی منابع	۷
۱-۲- مقدمه	۷
۲-۲- مدل سازی ترک در سازه‌های یک بعدی یا تیرها	۷
۱-۲-۲-۱- مدل سازی ترک با روش انعطاف پذیری موضعی	۸
۲-۲-۲-۲- مدل پیوسته خطی تیر ترک دار	۱۱
۳-۲-۲-۳- روش المان محدود برای مدل سازی ترک در تیرها	۱۳
۴-۲-۲-۴- مدل غیرخطی ترک	۱۴
۳-۲-۲-۳- مدل سازی ترک در سازه‌های دوبعدی (ورق)	۱۵

- ۴-۲- بررسی مدل‌های متداول ترک در سازه‌ها..... ۱۷
- ۴-۲-۱- مدل انعطاف‌پذیری موضعی برای ناحیه ترک‌دار تیرها..... ۱۸
- ۴-۲-۲- مدل پیوسته خطی تیر ترک‌دار..... ۲۳
- ۴-۲-۱-۲- فرکانس‌های طبیعی تیر ترک‌دار..... ۲۵
- ۴-۲-۳- مدل‌سازی ترک با روش المان محدود..... ۲۸
- ۴-۲-۴- مدل ترک غیرخطی خستگی..... ۳۱
- ۴-۲-۵- مدل انعطاف‌پذیری موضعی برای ورق با ترک سرتاسری..... ۳۴
- ۴-۲-۱-۵- آنالیز ارتعاشی ورق مستطیلی دارای ترک سرتاسری..... ۳۷
- ۴-۲-۶- تحلیل ارتعاشی ورق معیوب براساس کاهش موضعی در ضخامت ورق..... ۳۸
- ۳- فصل سوم: مواد و روش‌ها..... ۴۳**
- ۳-۱- مقدمه..... ۴۳
- ۳-۲- مدل‌سازی گسسته تیر یکسرگیردار ترک‌دار..... ۴۳
- ۳-۲-۱- بررسی و ارائه روش تحلیلی معادله حرکت..... ۴۴
- ۳-۲-۲- استخراج پاسخ ارتعاشات آزاد تیر ترک‌دار با ارائه حل مجانبی برای معادله (۳-۷)..... ۴۶
- ۳-۲-۳- تست‌های تجربی برای تعیین میراثی ناشی از ترک..... ۴۹
- ۳-۲-۴- تعیین محدوده حل مجانبی معتبر برحسب مقادیر پارامترهای واقعی سیستم..... ۵۳
- ۳-۲-۵- بررسی تاثیر مشخصات ترک بر رفتار ارتعاشات آزاد تیر یکسرگیردار ترک‌دار..... ۵۵
- ۳-۳- مدل‌سازی گسسته تیر دوسر مفصل ترک‌دار..... ۵۹
- ۳-۳-۱- محاسبه مقدار تغییر انعطاف‌پذیری تیر دوسر مفصل در اثر وجود ترک..... ۵۹
- ۳-۳-۲- استخراج معادله ارتعاشی حاکم بر تیر دوسر مفصل..... ۶۰
- ۳-۳-۳- بررسی تاثیر ترک بر رفتار ارتعاشات آزاد تیر دوسر مفصل..... ۶۲
- ۴-۳- مدل گسسته ورق ترک‌دار..... ۶۷
- ۳-۴-۱- محاسبه مقدار تغییر انعطاف‌پذیری ورق مستطیلی در اثر وجود ترک..... ۶۷



- ۲-۴-۳- استخراج معادله ارتعاشی حاکم بر سیستم ..... ۷۱
- ۳-۴-۳- بررسی تاثیر پارامترهای ترک بر رفتار ارتعاشات آزاد ورق ترک‌دار ..... ۷۶
- ۴-۴-۳- تست‌های تجربی ورق ترک‌دار ..... ۷۹
- ۱-۴-۴-۳- انجام تست‌ها و مقایسه نتایج ..... ۸۱
- ۵-۳- بهبود دقت مدل یک درجه آزادی سازه ترک‌دار در ارتعاش آزاد آن ..... ۸۴
- ۱-۵-۳- بررسی تاثیر مشخصات ترک بر رفتار ارتعاشات آزاد ورق ترک‌دار با استفاده از مدل گسسته  
بهبود یافته ..... ۸۷
- ۶-۳- آنالیز مجانبی ارتعاشات آزاد سیستم پیوسته تیر ترک‌دار ..... ۹۰
- ۱-۶-۳- اندازه‌گیری سفتی موضعی تیر در محل ترک به روش تجربی و ارائه رابطه‌ای برای نسبت سفتی  
تیر در محل ترک ..... ۹۲
- ۲-۶-۳- ارائه مدل پیوسته برای تحلیل مجانبی تیر ترک‌دار فولادی ..... ۹۴
- ۳-۶-۳- آنالیز مجانبی ارتعاشات آزاد سیستم پیوسته تیر ترک‌دار فولادی ..... ۱۰۰
- ۷-۳- ارائه روش تحلیلی برای آنالیز ارتعاشات آزاد تیر با یک ترک خستگی بر مبنای بالانس انرژی مکانیکی ..... ۱۰۴
- ۱-۷-۳- مدل‌سازی تغییرات سفتی موضعی ترک به صورت تابع غیرخطی از دامنه ارتعاش ..... ۱۰۴
- ۲-۷-۳- معادلات حاکم بر ارتعاشات عرضی تیر یکسرگیردار با مدل غیرخطی ترک ..... ۱۰۵
- ۳-۷-۳- بدست آوردن پاسخ ارتعاشات آزاد تیر ترک‌دار با استفاده از روش انرژی ..... ۱۰۷
- ۴-۷-۳- بررسی تاثیر پارامترهای ترک بر رفتار ارتعاشات آزاد تیر ترک‌دار ..... ۱۱۱
- ۸-۳- آنالیز ارتعاشات آزاد میرای تیر ترک‌دار به روش بالانس انرژی ..... ۱۱۴
- ۱-۸-۳- بدست آوردن پاسخ ارتعاشات آزاد میرای تیر ترک‌دار با استفاده از روش انرژی ..... ۱۱۴
- ۲-۸-۳- تعیین ضریب میرایی سیستم ..... ۱۱۷
- ۳-۸-۳- بررسی تاثیر پارامترهای ترک بر رفتار ارتعاشات آزاد میرای تیر ترک‌دار ..... ۱۱۷
- ۹-۳- شناسایی اثرات غیرخطی ترک در نوسانات کم دامنه تیر ترک‌دار ..... ۱۲۱
- ۱-۹-۳- بیان مساله ..... ۱۲۲
- ۲-۹-۳- ارائه حل بر مبنای روش اغتشاشات ..... ۱۲۲

۱۲۸	۳-۹-۳- اثرات غیرخطی ترک در نوسانات کم دامنه تیر فولادی.....
۱۳۱	۴- فصل چهارم: بحث و نتایج و پیشنهاد برای کارهای آینده.....
۱۳۱	۴-۱- مقدمه.....
۱۳۲	۴-۲- نتایج بدست آمده از تحلیل ارتعاشات آزاد تیر ترک‌دار با استفاده از مدل گسسته.....
۱۳۴	۴-۳- نتایج بدست آمده از تحلیل ارتعاشات آزاد ورق ترک‌دار با استفاده از مدل گسسته.....
۱۳۶	۴-۴- نتایج بدست آمده از تحلیل ارتعاشات آزاد تیر ترک‌دار با استفاده از مدل پیوسته.....
۱۳۷	۴-۵- نتایج بدست آمده از تحلیل ارتعاشات آزاد سیستم پیوسته تیر ترک‌دار به روش بالانس انرژی.....
۱۳۹	۴-۶- نتایج تحلیل ارتعاشات آزاد با دامنه کم تیر ترک‌دار به روش مقیاس‌های چندگانه.....
۱۴۱	مراجع.....
۱۴۸	ضمائم.....
۱۴۸	ضمیمه الف- جمع‌بندی نتایج حاصل از تست‌های تجربی.....
۱۵۷	ضمیمه ب- لیست مقالات.....
۱۵۸	چکیده انگلیسی.....

## فهرست اشکال و جداول

- شکل ۱-۱- نمونه‌ای از سطح بزرگنمایی شده یک ترک واقعی در تیر که در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه تبریز ایجاد شده است و با میکروسکوپ  $OLYMPUS B \times 61$  از آن تصویربرداری شده است ..... ۱
- شکل ۱-۲- الف) تیر همراه با ترک عرضی ب) مدل ریاضی تیر همراه با ترک عرضی ..... ۱۹
- شکل ۲-۲- تیر دو سر مفصل ترک‌دار با مدل انعطاف‌پذیری موضعی در محل ترک ..... ۲۲
- شکل ۳-۲- هندسه یک تیر دو سر مفصل با یک ترک عرضی [۶۳] ..... ۲۳
- شکل ۴-۲- حرکت عرضی یک تیر دو سر مفصل در مود اول ارتعاش آن با یک ترک عرضی در وسط آن [۶۳] ..... ۲۷
- شکل ۵-۲- تقسیم تیر به المانهای محدود که هر گره سه درجه آزادی دارد [۵۴] ..... ۳۱
- شکل ۶-۲- منحنی شماتیک بار-جابجائی [۸۵] ..... ۳۲
- شکل ۷-۲- الف) تیر یکسرگیردار ب) مدل یک درجه آزادی معادل ..... ۳۴
- شکل ۸-۲- باریکه ترک‌دار تحت گشتاور خمشی [۱۰۳] ..... ۳۵
- شکل ۹-۲- ورق با ترک سرتاسری تحت گشتاورهای خمشی  $M_x$  و  $M_y$  [۱۰۳] ..... ۳۶
- شکل ۱۰-۲- ورق مستطیلی با ترک سرتاسری در دستگاه مختصات بدون بعد [۱۰۲] ..... ۳۸
- شکل ۱۱-۲- ورق معیوب با عیب شیار [۱۱۰] ..... ۴۰
- شکل ۱۲-۲- شکل شماتیک ورق با عیوب شیار خطی [۱۱۰] ..... ۴۱
- شکل ۱-۳- الف) استخراج پاسخ ارتعاش آزاد تیر فولادی با سرعت‌سنج لیزری ب) دستگاه داده‌برادری چهار کاناله مدل  $B \& K$  (Type 3109) ..... ۵۰
- شکل ۲-۳- مقایسه نسبت میرائی در پاسخ تجربی ارتعاشات آزاد تیر یکسرگیردار با طول  $L = 26cm$  در دو حالت الف) سالم ب) ترک‌دار با پارامترهای  $\alpha = 0.41$  و  $\beta = 0.84$  ..... ۵۱
- شکل ۳-۳- منحنی تغییرات میرائی مدل گسسته در برابر پارامتر  $\varepsilon$  که نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0) و منحنی برازش شده (—) است ..... ۵۲

شکل ۳-۴- منحنی انتقال مربوط به حل معادله ماتیو برای مدل گسسته که مشخص کننده مرز نواحی پایدار و ناپایدار

است. نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0) و منحنی برازش شده (—) نقاط روی منحنی‌ها معرف حل دوره‌ای است

۵۳ .....

شکل ۳-۵- منحنی تغییرات  $\varepsilon$  در برابر پارامتر  $\frac{\Delta C}{C}$  ..... ۵۴

شکل ۳-۶- دیاگرام سه بعدی تغییرات پارامتر  $\frac{\Delta C}{C}$  بر حسب  $\alpha$  و  $\frac{Lc}{L}$  ..... ۵۴

شکل ۳-۷- محدوده تغییرات  $\frac{\Delta C}{C}$  و  $\alpha$  که در آن  $\frac{\Delta C}{C} < 1.5$  است ..... ۵۵

شکل ۳-۸- پاسخ زمانی آزاد تیر به طول  $L = 30cm$  با ترک خستگی (مدل گسسته) با عمق نسبی  $\alpha = 0.41$  و

در موقعیت: الف)  $\beta = 0.73$ ، ب)  $\beta = 0.98$  ..... ۵۶

شکل ۳-۹- طیف پاسخ آزاد تیر با ترک خستگی با عمق نسبی  $\alpha = 0.41$  و در موقعیت نسبی: الف)  $\beta = 0.73$ ،

ب)  $\beta = 0.98$  ..... ۵۶

شکل ۳-۱۰- تغییرات نسبت فرکانسی تیر یکسرگیردار ترک‌دار با تغییر موقعیت نسبی ترک به ازای مقادیر مختلف

عمق نسبی ترک ..... ۵۷

شکل ۳-۱۱- تغییرات نسبت میرائی تیر یکسرگیردار ترک‌دار با طول ثابت در برابر تغییر موقعیت نسبی ترک به ازای

مقادیر مختلف عمق نسبی ترک ..... ۵۸

شکل ۳-۱۲- مقایسه تغییرات نسبت فرکانسی به ازای تغییرات موقعیت نسبی ترک با مدل‌های خطی و غیرخطی در

تیر یکسرگیردار با ترکی با پارامترهای  $\alpha = 0.36$  و  $L_c = 14.65 cm$  ..... ۵۸

شکل ۳-۱۳- الف) تیر دوسر مفصل ترک‌دار ب) مدل یک درجه آزادی معادل ..... ۶۱

شکل ۳-۱۴- پاسخ جابجائی ارتعاشات آزاد تیر دوسر مفصل با ترک خستگی در موقعیت نسبی  $\frac{L_0}{L} = 0.25$  و با عمق

نسبی ترک: الف)  $\alpha = 0.30$ ، ب)  $\alpha = 0.50$  ..... ۶۲

شکل ۳-۱۵- پاسخ بدست آمده از ارتعاشات آزاد تیر ترک‌دار به روش عددی (رانگ - کوتا مرتبه ۴) برای ترکی با

موقعیت نسبی  $\frac{L_0}{L} = 0.25$  و عمق نسبی  $\alpha = 0.3$  ..... ۶۳

شکل ۳-۱۶- طیف پاسخ جابجائی تیر ترک‌دار دوسر مفصل با عمق نسبی: الف)  $\alpha = 0.3$ ، ب)  $\alpha = 0.5$  ..... ۶۳

شکل ۳-۱۷- محدوده حل معتبر برای تیر آلومینیومی ترک‌دار دوسر مفصل با ابعاد  $23 \times 7 \times 235 mm^3$  ..... ۶۴

شکل ۳-۱۸- مقایسه تغییرات نسبت فرکانسی برای تیر دوسر مفصل با ترک خستگی ( ) و با ترک کاملاً باز ( - ) .

(-) با نتایج تست‌های تجربی (0) [۶۳] در برابر عمق نسبی ترک که موقعیت نسبی ترک  $\frac{L_0}{L} = 0.5$  است ..... ۶۵

شکل ۳-۱۹- تغییرات نسبت میرائی تیر ترک‌دار دوسر مفصل در برابر تغییر موقعیت نسبی ترک به ازای مقادیر

مختلف عمق نسبی ترک: الف)  $\alpha = 0.1, 0.2, 0.3$  ب)  $\alpha = 0.4, 0.5$  ..... ۶۵

شکل ۳-۲۰- باریکه ترک‌دار تحت گشتاور خمشی و نیروی کششی [۱۰۲] ..... ۶۸

شکل ۳-۲۱- ورق مستطیلی ترک‌دار تحت فشار، با دو تکیه‌گاه ساده و دو لبه آزاد که ترک به فاصله  $a_c$  از محور  $y$  قرار

دارد ..... ۶۹

شکل ۳-۲۲- مدل یک درجه آزادی ورق ترک‌دار ..... ۷۵

شکل ۳-۲۳- پاسخ ورق با ترک خستگی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و با شدت: الف)  $\alpha = 0.3$  ب)  $\alpha = 0.5$  ..... ۷۶

شکل ۳-۲۴- طیف پاسخ ورق ترک‌دار با ترک خستگی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و با شدت: الف)  $\alpha = 0.3$  ب)

.....  $\alpha = 0.5$  ..... ۷۷

شکل ۳-۲۵- کانتور سه بعدی تغییرات  $\frac{\Delta C}{C}$  در برابر  $\alpha$  و  $\frac{a_c}{a}$  برای ورق مستطیلی فولادی ترک‌دار با دو تکیه‌گاه

ساده و دو لبه آزاد به ابعاد  $(181 \times 269 \text{ mm}^2)$  و ضخامت  $H = 3.34 \text{ mm}$  ..... ۷۸

شکل ۳-۲۶- تغییرات نسبت فرکانسی ورق ترک‌دار، با تغییر موقعیت نسبی ترک به ازای مقادیر مختلف عمق نسبی

ترک ..... ۷۸

شکل ۳-۲۷- تغییرات نسبت میرائی ورق ترک‌دار در برابر موقعیت نسبی ترک به ازای مقادیر مختلف شدت ترک .. ۷۹

شکل ۳-۲۸- مجموعه تجهیزات آزمایش‌های تجربی ..... ۸۰

شکل ۳-۲۹- نحوه ایجاد تکیه‌گاه ساده در دو ضلع رو بهم ورق مستطیلی ..... ۸۰

شکل ۳-۳۰- ورق با شیار سرتاسری مورد آزمایش که دو لبه مقابل به هم آن بر روی تکیه‌گاه‌های ساده و دولبه دیگر آن

آزاد است ..... ۸۱

شکل ۳-۳۱- مقایسه تغییرات نسبت فرکانسی در برابر شدت ترک برای ورق به ازای موقعیت نسبی الف)  $\frac{a_c}{a} = 0.5$

ب)  $\frac{a_c}{a} = 0.385$  ..... ۸۲

- شکل ۳-۳۲- شکل مود ورق ترک‌دار شماره ۲ با شدت ترک  $\alpha = 0.19$ ، حاصل از تست‌های تجربی ..... ۸۳
- شکل ۳-۳۳- پاسخ ارتعاشات آزاد ورق ترک‌دار بدست آمده از روش عددی (رانگ - کوتا مرتبه ۴) برای ترکی با موقعیت نسبی  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و عمق نسبی  $\alpha = 0.3$  ..... ۸۳
- شکل ۳-۳۴- دیاگرام صفحه فاز برای ورق شماره ۱ با ترکی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و عمق نسبی: الف)  $\alpha = 0.3$  (ب)  $\alpha = 0.5$  ..... ۸۴
- شکل ۳-۳۵- پاسخ ورق با ترک خستگی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و با شدت: الف)  $\alpha = 0.3$  (ب)  $\alpha = 0.5$ ، با استفاده از مدل گسسته بهبود یافته ..... ۸۷
- شکل ۳-۳۶- سفتی متغیر با زمان ورق در سیکل اول ارتعاش با ترک خستگی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و با شدت: الف)  $\alpha = 0.3$  (ب)  $\alpha = 0.5$  ..... ۸۸
- شکل ۳-۳۷- تغییرات زمانی فرکانس ارتعاش ورق با ترک خستگی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و با شدت: الف)  $\alpha = 0.3$  (ب)  $\alpha = 0.5$  ..... ۸۹
- شکل ۳-۳۸- طیف پاسخ ورق ترک‌دار با ترک خستگی در موقعیت  $\frac{a_c}{a} = 0.5$  و با شدت: الف)  $\alpha = 0.3$  (ب)  $\alpha = 0.5$ ، با استفاده از مدل گسسته بهبود یافته ..... ۸۹
- شکل ۳-۳۹- دستگاه تست خستگی با قابلیت بارگذاری تناوبی که تیرهای فولادی برای ایجاد ترک بین دو فک دستگاه بسته می‌شود ..... ۹۱
- شکل ۳-۴۰- نقاط تجربی حاصل از آزمایش (O) و منحنی برازش شده (\_\_\_) گشتاور خمشی در برابر اختلاف شیب در محل ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.18$  ..... ۹۲
- شکل ۳-۴۱- نقاط تجربی حاصل از آزمایش (O) و منحنی برازش شده (\_\_\_) گشتاور خمشی در برابر اختلاف شیب در محل ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.41$  ..... ۹۳
- شکل ۳-۴۲- نقاط تجربی حاصل از آزمایش (O) و منحنی برازش شده (\_\_\_) نسبت سفتی تیر در محل ترک در حالت بسته شدن و باز شدن کامل ترک به عمق ترک ..... ۹۴
- شکل ۳-۴۳- الف) تیر یکسرگیردار ترک‌دار (ب) مدل ریاضی تیر ترک‌دار ..... ۹۵

شکل ۳-۴۴- منحنی انتقال مربوط به حل معادله ماتیو برای مدل پیوسته که مشخص کننده مرز نواحی پایدار و ناپایدار است. نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0) و منحنی برازش شده ( ) ..... ۹۹

شکل ۳-۴۵- منحنی تغییرات میرائی مدل پیوسته در برابر پارامتر  $\varepsilon$  که نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0) و منحنی برازش شده ( ) است ..... ۱۰۰

شکل ۳-۴۶- پاسخ زمانی ارتعاشات آزاد تیر با ترک خستگی (مدل پیوسته) با عمق نسبی  $\alpha = 0.41$  و در موقعیت: الف)  $\beta = 0.73$  ب)  $\beta = 0.98$  ..... ۱۰۱

شکل ۳-۴۷- طیف پاسخ آزاد تیر یکسرگیردار ترک‌دار (مدل پیوسته) با عمق نسبی  $\alpha = 0.41$  و در موقعیت نسبی: الف)  $\beta = 0.73$  ب)  $\beta = 0.98$  ..... ۱۰۱

شکل ۳-۴۸- پاسخ بدست آمده از ارتعاشات آزاد تیر یکسرگیردار ترک‌دار به روش عددی (رانگ - کوتا مرتبه ۴) با پارامترهای ترک  $\alpha = 0.41$  و  $\beta = 0.73$  ..... ۱۰۲

شکل ۳-۴۹- مقایسه تغییرات نسبت فرکانسی برای تیر یکسرگیردار با ترک خستگی با استفاده از مدل پیوسته ( ) و با ترک کاملاً باز ( - - - ) با نتایج تست‌های تجربی (0) در برابر موقعیت نسبی ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  ... ۱۰۲

شکل ۳-۵۰- مقایسه تغییرات نسبت میرائی تیر یکسرگیردار ترک‌دار با نتایج تست‌های تجربی (0) در برابر موقعیت نسبی ترک به ازای مقادیر مختلف پارامترهای ترک: الف)  $\alpha = 0.36$ ،  $L_c = 14.7 \text{ cm}$  و ب)  $\alpha = 0.41$ ،  $L_c = 21.9 \text{ cm}$  ..... ۱۰۳

شکل ۳-۵۱- الف) تیر یکسرگیردار ترک‌دار ب) مدل ریاضی تیر ترک‌دار ..... ۱۰۵

شکل ۳-۵۲- بازه تغییرات فرکانسی تیر با ترکی در موقعیت نسبی  $\beta = 0.977$  و عمق نسبی ترک  $\alpha = 0.36$  بر حسب الف) دامنه ب) زمان ..... ۱۱۱

شکل ۳-۵۳- نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0) و منحنی برازش شده ( ) (گشتاور خمشی در برابر اختلاف شیب در محل ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  ..... ۱۱۲

شکل ۳-۵۴- طیف فرکانسی پاسخ تیر ترک‌دار با ترک خستگی در موقعیت  $\beta = 0.366$  و با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  حاصل از: الف) روش تئوری پیشنهادی ب) تست آنالیز مودال تجربی ..... ۱۱۲

شکل ۳-۵۵- مقایسه تغییرات نسبت فرکانسی برای تیر یکسرگیردار با ترک خستگی ( ) و با ترک کاملاً باز ( - - ) با نتایج تست‌های تجربی (0) در برابر موقعیت نسبی ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  ..... ۱۱۳

شکل ۳-۵۶- بازه تغییرات فرکانسی تیر با ترکی در موقعیت نسبی  $\beta = 0.81$  و عمق نسبی ترک  $\alpha = 0.36$  ... ۱۱۸

شکل ۳-۵۷- پاسخ سرعت ارتعاشات آزاد بدست آمده از روش ارائه شده برای تیر یکسرگیردار با ترک خستگی با عمق

نسبی ترک  $\alpha = 0.36$  و در موقعیت نسبی: الف)  $\beta = 0.37$  و ب)  $\beta = 0.81$  ..... ۱۱۹

شکل ۳-۵۸- پاسخ سرعت ارتعاشات آزاد برای تیر یکسرگیردار حاصل از تست‌های تجربی با ترک خستگی با عمق

نسبی ترک  $\alpha = 0.36$  و در موقعیت نسبی: الف)  $\beta = 0.37$  و ب)  $\beta = 0.81$  ..... ۱۱۹

شکل ۳-۵۹- طیف پاسخ جابجائی حاصل از روش ارائه شده (---) و حاصل از تست‌های تجربی (\_\_\_) برای تیر

یکسرگیردار با ترک خستگی با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  و در موقعیت نسبی: الف)  $\beta = 0.37$  و ب)  $\beta = 0.81$  .. ۱۲۰

شکل ۳-۶۰- منحنی تغییرات نسبت فرکانسی برای تیر یکسرگیردار با مدل ترک خستگی در دو حالت، با در نظر

گرفتن اثرات میرائی سازه‌ای و میرائی در محل ترک (\_\_\_)، بدون در نظر گرفتن اثرات میرائی (---) و با مدل ترک

باز بدون اثرات میرائی (...). و نتایج تست‌های تجربی (0) در برابر موقعیت نسبی ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  .... ۱۲۱

شکل ۳-۶۱- الف- نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0)، منحنی  $M_y = \bar{k}\theta + 868774\theta^2 - 5.76 \times 10^9 \theta^3 N.m$  (\_\_\_)

(\_\_\_)، گشتاور خمشی در برابر اختلاف شیب در محل ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.36$  ..... ۱۲۹

شکل ۳-۶۱- ب- نقاط تجربی حاصل از آزمایش (0)، منحنی  $M_y = \bar{k}\theta - 6.3 \times 10^6 \theta^2 - 9.4 \times 10^9 \theta^3 N.m$  (\_\_\_)

(\_\_\_)، گشتاور خمشی در برابر اختلاف شیب در محل ترک با عمق نسبی  $\alpha = 0.18$  ..... ۱۳۰

شکل ۳-۶۲- تغییرات فرکانس تیر ترک‌دار فولادی در برابر دامنه انتهای آزاد آن که ضریب سفتی خطی آن  $\bar{k}$  است

الف)  $L = 15 cm$ ،  $\alpha = 0.36$  و  $\beta = 0.98$  ب)  $L = 23 cm$ ،  $\alpha = 0.18$  و  $\beta = 0.98$  ..... ۱۳۰

شکل الف-۱- اسباب تست تهیه شده برای تحلیل ارتعاشات عرضی تیر ترک‌دار ..... ۱۴۹

شکل الف-۲- ساز و کار تست مودال ورق با شرایط تکیه‌گاهی SFSSF ..... ۱۴۹

شکل الف-۳- تیر فولادی بسته شده به دستگاه تست خستگی برای ایجاد ترک ..... ۱۵۰

شکل الف-۴- نحوه مش‌بندی ورق معیوب SFSSF و شکل مود ارتعاشی ورق ..... ۱۵۴

شکل الف-۵- شکل شماتیک از تجهیزات تست ورق SFSSF ..... ۱۵۵

شکل الف-۶- مقایسه نسبت میرائی در پاسخ شتاب تجربی ارتعاشات آزاد تیر یکسرگیردار با طول  $L = 20cm$  در دو

حالت الف) سالم ب) ترک‌دار با پارامترهای  $\alpha = 0.36$  و  $\beta = 0.73$  ..... ۱۵۶

شکل الف-۷- مقایسه نسبت میرائی در پاسخ سرعت تجربی ارتعاشات آزاد تیر یکسرگیردار با طول  $L = 20cm$  در دو

حالت الف) سالم ب) ترک‌دار با پارامترهای  $\alpha = 0.36$  و  $\beta = 0.73$  ..... ۱۵۶



جدول ۳-۱- نسبت‌های میرائی بدست آمده از نتایج تجربی برای تیر ترک‌دار فولادی به ابعاد  $3.9 \times 6.4 \text{mm}^2$  به ازای عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف نسبی ترک، جهت تعیین منحنی انتقال تیر ترک‌دار در صفحه  $\varepsilon - \delta$  برای مدل گسسته

..... ۵۱

جدول ۳-۲- مقادیر  $\delta$  و  $\varepsilon$  بدست آمده از نتایج تجربی برای تیر ترک‌دار فولادی به ابعاد  $3.9 \times 6.4 \text{mm}^2$  به ازای عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف نسبی ترک، متناظر با جدول ۳-۱، جهت تعیین منحنی انتقال تیر ترک‌دار در

صفحه  $\varepsilon - \delta$  ..... ۹۹

جدول الف-۱. مشخصات تجهیزات جنبی تست برای استخراج مشخصه‌های ارتعاشی سازه ترک‌دار ..... ۱۵۱

## فهرست نمادها

## نمادهای لاتین

$A$	دامنه نقطه مشخصی از تیر ترک‌دار
$A_c$	دامنه اولیه‌ای که دهانه ترک را بطور کامل می‌بندد
$A_o$	دامنه‌ای که به ازای آن دهانه ترک بطور کامل باز می‌شود
$a$	طول ورق
$a_c$	موقعیت ترک در ورق
$b$	عرض ورق
$b_s$	پهنای باریکه
$C$	انعطاف‌پذیری سازه ترک‌دار
$C_o$	انعطاف‌پذیری سازه در حالت باز بودن کامل ترک
$C_0$	انعطاف‌پذیری سازه سالم
$c$	ضریب میرایی سازه ناشی از وجود ترک
$c_b$	ضریب افزایش انعطاف‌پذیری باریکه به واسطه وجود ترک
$c_s$	ضریب میرایی سازه‌ای
$D$	سفتی خمشی ورق
$E$	مدول الاستیسته
$E_c$	کل انرژی تیر در لحظه شروع حرکت متناظر با حالت کاملاً بسته ترک
$E_{c_c}$	اتلاف انرژی مکانیکی تیر در محل ترک
$E_{c_s}$	اتلاف انرژی ناشی از میرایی سازه‌ای
$E_K$	انرژی جنبشی تیر
$E_p$	انرژی کرنشی تیر ناشی از خیز آن
$E_s$	انرژی ذخیره شده در محل ترک
$E_t$	کل انرژی تیر در لحظه $t$
$F$	نیروی خارجی
$g_b$	تابع بدون بعد برحسب عمق نسبی ترک در ورق ناشی از ممان خمشی
$g_t$	تابع بدون بعد برحسب عمق نسبی ترک در ورق ناشی از نیروی کششی
$H$	ضخامت ورق
$h$	ارتفاع سطح مقطع تیر
$I$	ممان اینرسی سطح مقطع تیر
$J$	کمپلاینس خمشی
$J_s$	نرخ آزاد شدن انرژی پتانسیل
$K$	فاکتور شدت تنش
$k$	معرف تغییرات سفتی سازه
$k^*$	سفتی معادل ورق سالم
$k_A$	سفتی موضعی محل ترک برحسب دامنه ارتعاش

$k_c$	سفتی سازه سالم
$k_t$	سفتی موضعی تابع زمان
$k_2$	ضریب فنر غیر خطی
$k_3$	ضریب فنر غیر خطی
$k_o$	سفتی سازه ترک‌دار در حالت باز بودن ترک
$k_{\Delta c}$	دامنه تغییرات سفتی سازه ترک‌دار
$L$	طول تیر
$L_c$	موقعیت ترک در تیر یکسرگیردار از انتهای آزاد آن
$L_0$	موقعیت ترک در تیر از مبدا مختصات
$M$	جرم واحد سطح ورق
$M_s$	ممان خمشی در محل ترک
$m$	جرم واحد طول تیر
$m^*$	جرم معادل ورق سالم
$N_x$	نیروی فشاری توزیع شده وارد بر طول ورق
$P$	بار هدف وارد بر وسط سازه
$q(t)$	جابجائی
$s(t)$	جابجائی وسط ورق مستطیلی ترک‌دار
$U_s$	انرژی جذب شده توسط ترک در سازه
$u(t)$	پاسخ ارتعاش آزاد میرا مدل گسسته تیر ترک‌دار
$T_0$	مقیاس زمانی سریع
$T_1$	مقیاس زمانی کند
$t$	زمان
$W$	تابع خیز سازه سالم
$W_1$	تابع خیز تیر در سمت راست ترک
$W_2$	تابع خیز تیر در سمت چپ ترک
$w$	پهنای سطح مقطع تیر
$y(t)$	پاسخ ارتعاش آزاد نامیرا مدل گسسته تیر ترک‌دار
	<b>نمادهای یونانی</b>
$\alpha$	عمق نسبی ترک
$\alpha_{bb}$	انعطاف‌پذیری خمشی بدون بعد
$\beta$	موقعیت نسبی ترک
$\Delta E_{d_i}$	انرژی تلف شده در سیستم ارتعاشی هنگام جابجائی بین دو دامنه متوالی
$\Delta C$	تغییر انعطاف‌پذیری سازه ناشی از وجود ترک
$\Delta \omega$	تغییر فرکانس زاویه‌ای
$\delta$	پارامتر بدون بعد نزدیک به عدد چهار، تابعی از مشخصات مکانیکی سازه ترک‌دار
$\delta(y)$	تابع دلتای دیراک

$\varepsilon$	پارامتر بدون بعد کوچکتر از یک، تابعی از مشخصات مکانیکی سازه ترک‌دار
$\zeta$	نسبت میرائی
$\zeta_0$	نسبت میرائی تیر سالم
$\zeta_1$	نسبت میرائی تیر ترک‌دار
$\eta_i$	بخش زمانی پاسخ پاسخ دینامیکی تیر ترک‌دار در مدل پیوسته
$\Theta$	اختلاف شکل مود تیر در طرفین ترک
$\theta$	اختلاف زاویه شیب طرفین ترک
$\theta_c$	اختلاف شیب شکل مودهای تیر در دو طرف ترک کاملاً بسته
$\theta_1$	اختلاف شیب شکل مودهای تیر در دو طرف ترک در مرحله $n$ ام
$\theta_0$	اختلاف شیب شکل مودهای تیر در دو طرف ترک کاملاً باز
$\lambda$	مقدار ویژه سازه ترک‌دار
$\mu_i$	ضرایب بدون بعد تابع نسبت میرائی سازه ترک‌دار
$\nu$	نسبت پواسون
$\rho$	چگالی ماده
$\sigma$	تنش قائم یکنواخت وارده به سازه
$\sigma_b$	مقدار تنش در امتداد عمود بر سطح ترک
$\sigma_t$	تنش کششی وارد بر باریکه تحت حالت کرنش صفحه‌ای
$\zeta$	نسبت عمق ترک به ضخامت باریکه
$u_i$	جملات غیرسکولار
$\tau$	تغییر متغیر زمانی جهت حل معادله حاکم بر نوسانات سازه
$\varphi$	تابع چند جمله‌ای از عمق ترک
$\phi$	شکل مود سازه سالم
$\phi_1$	شکل مود سازه در سمت راست ترک
$\phi_2$	شکل مود سازه در سمت چپ ترک
$\psi$	شکل مود ارتعاشی ورق سالم
$\psi_i$	جملات سکولار
$\omega$	فرکانس زاویه‌ای
$\omega_b$	فرکانس دوخطی سازه ترک‌دار
$\omega_c$	فرکانس طبیعی سازه ترک‌دار در حالت ترک کاملاً بسته
$\omega_n$	فرکانس طبیعی سازه سالم
$\omega_0$	فرکانس طبیعی سازه ترک‌دار در حالت ترک کاملاً باز